

ESTIMACIÓN DEL DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) CAPTURADO POR BIOMASA
AÉREA DE LA MANDARINA “ARRAYANA” MEDIANTE LA RELACIÓN: L-SISTEMAS
Y ECUACIONES DIFERENCIALES



MARÍA CAMILA GUTIÉRREZ BERMÚDEZ
MARÍA PAULA GUTIÉRREZ FRANCO



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2020

ESTIMACIÓN DEL DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) CAPTURADO POR BIOMASA
AÉREA DE LA MANDARINA “ARRAYANA” MEDIANTE LA RELACIÓN: L-SISTEMAS
Y ECUACIONES DIFERENCIALES

MARÍA CAMILA GUTIÉRREZ BERMÚDEZ
MARÍA PAULA GUTIÉRREZ FRANCO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniera Ambiental

Asesor

JORGE MAURICIO SÁNCHEZ USECHE

Licenciado en Matemáticas, MSc. Docencia de la Matemática

Co-asesor

JAIR ESTEBAN BURGOS CONTENITO

Ingeniero Ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2020

Autoridades académicas

P. JOSE GABRIEL MESA ANGULO, O.P.

Rector General

P. EDUARDO GONZALES GIL, O.P.

Vicerrector Académico General

P. JOSE ANTONIO BALAGUERA CERPADA, OP.

Rector Sede Villavicencio

P. RODRIGO GARCIA JARA, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

MG. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decana de Facultad de Ingeniería Ambiental

Nota De Aceptación

NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decana de Facultad de Psicología

JORGE MAURICIO SANCHEZ USECHE

Asesor Trabajo de Grado

JAIR ESTEBAN BURGOS CONTENTO

Co-asesor Trabajo de Grado

RODRIGO ISAAC VELOSA

Jurado 1

JORGE ELIECER PARDO

Jurado 2

Villavicencio, julio de 2020

Agradecimientos

Gracias a Dios por darme salud, tenacidad y disciplina para sacar adelante esta carrera. Mi tesis la dedico especialmente a mi madre, gracias por su sacrificio y esfuerzo, por darme una carrera para nuestro futuro y creer en mi capacidad; porque a pesar de todas las dificultades siempre ha estado para apoyarme y alentarme en cada paso que doy; a ella le debo todo lo que soy y espero algún día poder devolverle la mitad de las cosas que ha hecho por mí.

Gracias a mi familia y amigos por su apoyo incondicional; es especial, a mi compañera de tesis y amiga, por compartir conmigo esta experiencia y porque a pesar de los trasnochos, desacuerdos y diferencias, pudimos culminar con éxito y conservar una amistad por el resto de nuestras vidas. Por último, pero no menos importante, agradezco a cada docente que me brindó sus conocimientos durante toda mi carrera; específicamente, a los asesores de mi tesis por su tiempo, compromiso y dedicación para que este trabajo de grado fuera lo más auténtico posible.

María Camila Gutiérrez Bermúdez

Inicialmente doy gracias a Dios, porque gracias a ÉL todo es posible; agradezco a mis papás Myriam y Jelber por brindarme el privilegio de estudiar una carrera profesional, gracias por estar conmigo semestre a semestre y motivarme a dar siempre lo mejor de mí; también quiero agradecerle a mi hermana Lina porque con su ejemplo me motiva a ser una excelente estudiante, profesional y persona; del mismo modo, a mi hermano Jelber por su paciencia y apoyo durante todo el transcurso de mi carrera; igualmente un agradecimiento a todos los docentes que estuvieron en mi proceso de aprendizaje durante toda la carrera, porque además de formarme profesionalmente me ayudaron a crecer íntegramente; de manera especial un agradecimiento al profe Mauricio y Jair por su tiempo, dedicación, consejos y apoyo durante toda la elaboración de este trabajo y sobre todo, a mi compañera y amiga Camila porque fue la mejor aliada para elaborar este trabajo.

María Paula Gutiérrez Franco

Contenido

	Pág.
Resumen.....	15
Introducción	17
1. Planteamiento del problema	19
1.1. Descripción del problema	19
1.1.1. Formulación en torno al problema.	21
1.2. Hipótesis	21
1.2.1. Hipótesis de investigación (Hi).....	21
1.2.2. Hipótesis nula (Ho).	21
1.2.3. Hipótesis alternativa (Ha).	21
2. Objetivos	22
2.1. Objetivo general	22
2.2. Objetivos específicos	22
3. Justificación.....	23
4. Alcance.....	25
5. Antecedentes.....	26
6. Marco de referencia	29
6.1. Marco teórico	29
6.2. Marco conceptual	35
6.3. Marco legal	40
7. Metodología.....	41
7.1. Fase 1: Construcción del patrón de crecimiento de la planta mediante los L-sistemas 41	
7.1.1. Actividad 1: Determinación de las variables del L-sistema.	41
7.1.2. Actividad 2: Modelamiento del patrón de crecimiento.	42
7.2. Fase 2: Cálculo del número de ramas y hojas de la planta	42

7.2.1.	Actividad 1: Solución del modelo de crecimiento exponencial dado por las ecuaciones diferenciales.	42
7.3.	Fase 3: Estimación de captura de dióxido de carbono (CO ₂) de la planta.....	42
7.3.1.	Actividad 1: Asignación de tiempo de crecimiento a cada iteración.	42
7.3.2.	Actividad 2: Caracterización del suelo.	44
7.3.3.	Actividad 3: Extrapolación de datos teóricos de captura de CO ₂ con respecto a la iteración y su tiempo de crecimiento.	47
7.3.4.	Actividad 4: Relación de la captura de CO ₂ , cantidad de ramas y hojas, iteraciones totales, crecimiento de altura total, concentración de nitratos, humedad y pH de las plantas.	
	47	
8.	Resultados y análisis de resultados	48
8.1.	Fase 1: Construcción del patrón de crecimiento de la planta mediante los L-sistemas	
	48	
8.1.1.	Actividad 1: Determinación de las variables del L-sistema.	48
8.1.2.	Actividad 2: Modelamiento del patrón de crecimiento.	48
8.2.	Fase 2: Cálculo del número de ramas y hojas de la planta	49
8.2.1.	Actividad 1: Solución del modelo de crecimiento exponencial dado por las ecuaciones diferenciales.	49
8.3.	Fase 3: Estimación de captura de dióxido de carbono (CO ₂) de la planta.....	52
8.3.1.	Actividad 1: Asignación de tiempo de crecimiento a cada iteración.	52
8.3.2.	Actividad 2: Caracterización del suelo	64
8.3.3.	Actividad 3: Extrapolación de datos teóricos de captura de CO ₂ con respecto a la iteración y su tiempo de crecimiento.	69
8.3.4.	Actividad 4: Relación de la captura de CO ₂ , cantidad de ramas y hojas, iteraciones totales, crecimiento de altura total, concentración de nitratos, humedad y pH de las plantas.	
	73	
	Conclusiones	78
	Recomendaciones	81

Referencias bibliográficas.....	82
Apéndices.....	92

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Significado del rango de correlación.....	34
Tabla 2. Normatividad legal.....	40
Tabla 3. Distribución en bloques de las 15 plantas sembradas.	43
Tabla 4. Asignación aleatoria del factor de tratamiento por bloques.	43
Tabla 5. Formato de seguimiento de trabajo de campo.	44
Tabla 6. Formato para registrar los datos de absorbancia para las soluciones patrón.	46
Tabla 7. Variables del L-sistema de una planta de mandarina “Arrayana”.	48
Tabla 8. Iteraciones del patrón de crecimiento de la planta.	49
Tabla 9. Resultados de la aplicación del modelo para cada iteración.	51
Tabla 10. Promedio de iteraciones por bloque.	54
Tabla 11. Acumulado de ramas y hojas por planta.....	56
Tabla 12. Datos recolectados de humedad y pH de las muestras de suelo.	64
Tabla 13. Absorbancias registradas para cada solución de trabajo.	67
Tabla 14. Concentraciones de nitratos calculadas para cada muestra.	68
Tabla 15. Captura de CO ₂ de las plantas 1-15.....	70
Tabla 16. Captura de CO ₂ para diferentes años de la mandarina "Arrayana".....	71
Tabla 17. Comparación de captura de CO ₂ entre especies vegetales.	72
Tabla 18. Recopilación de las variables de la mandarina “Arrayana”.	73
Tabla 19. Matriz de correlación entre las variables de las plantas.	74
Tabla 20. Niveles de correlación.	75
Tabla 21. Resumen del modelo de regresión lineal.....	76
Tabla 22. Análisis de la varianza con un factor (ANOVA).	76
Tabla 23. Coeficientes del modelo de regresión lineal.	77

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Área de estudio del proyecto, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.	25
Figura 2. Longitudes de onda para los diferentes espectros (Abril, y otros, 2014).....	33
Figura 3. Medidor de pH o humedad del suelo (Mactronica, 2019).	44
Figura 4. Diferentes concentraciones de nitrato de potasio (KNO_3), por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.	120
Figura 5. Sachet de nitratos, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.....	120
Figura 6. Diferentes concentraciones de nitrato de potasio (KNO_3) con adición de sachet de nitratos, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.	120
Figura 7. Celdas de cuarzo de espectrofotómetro, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.....	120
Figura 8. Solución de una concentración en la celda de cuarzo, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.	120
Figura 9. Lectura en el espectrofotómetro, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.	120
Figura 10. Muestras de suelo de los 15 puntos de siembra de las plantas después del proceso de secado, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.....	121
Figura 11. Trituración y tamizaje de las muestras de suelo, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.	121
Figura 12. Mezcla de las muestras de suelo en 100 ml de agua destilada, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.	121
Figura 13. Soluciones de suelo (10ml) con adición de sachet de nitratos, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.	121

Lista de Ecuaciones

	Pág.
Ecuación 1. Dimensión fractal (Rubiano, 2002).	30
Ecuación 2. Modelo matemático de crecimiento exponencial (Zill, 2009).	31
Ecuación 3. Solución general del modelo de crecimiento exponencial (Zill, 2009).	31
Ecuación 4. Modelo de regresión lineal (González J. , 2009).....	35
Ecuación 5. Solución particular del modelo de crecimiento exponencial de la planta de mandarina “Arrayana”	50
Ecuación 6. Ecuación de la línea de tendencia.....	67
Ecuación 7. Ecuación para calcular la concentración de nitratos.....	68
Ecuación 8. Modelo de regresión lineal para la captura de CO ₂	77
Ecuación 9. Modelo de regresión lineal ajustado para la captura de CO ₂	77

Lista de Gráficas

Pág.

Gráfica 1. Relación entre la cantidad de ramas y hojas generadas por iteración y el total de ramas y hojas, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.....	51
Gráfica 2. Registro de iteraciones semanales por planta, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.	53
Gráfica 3. Iteraciones realizadas por las plantas durante 13 semanas, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.	54
Gráfica 4. Relación porcentual de la cantidad de iteraciones por semana respecto al total de iteraciones realizadas por todas las plantas, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.	55
Gráfica 5. Relación entre el total de ramas y hojas con las iteraciones, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.	57
Gráfica 6. Registro semanal de las iteraciones en las plantas placebo, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.	59
Gráfica 7. Registro semanal de las iteraciones en plantas con tratamiento 1, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.....	59
Gráfica 8. Registro semanal de las iteraciones en plantas con tratamiento 2, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.....	60
Gráfica 9. Registro semanal de las iteraciones en plantas con tratamiento 3, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.....	61
Gráfica 10. Registro semanal de iteraciones en plantas con tratamiento 4, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.	62
Gráfica 11. Registro de alturas semanales por planta, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.....	62
Gráfica 12. Crecimiento en cm de las plantas durante 13 semanas, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.	63
Gráfica 13. Relación porcentual de la cantidad de cm crecidos por semana respecto al total de cm crecidos por todas las plantas, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.	63

Gráfica 14. Evaluación de la absorbancia a diferentes longitudes de onda, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.	66
Gráfica 15. Curva de calibración de nitratos, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.	67

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Registros semanales de iteraciones y altura de las plantas, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.	92
Apéndice B. Registros fotográficos semanales de las plantas, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.	94
Apéndice C. Evaluación inicial de la absorbancia a diferentes longitudes de onda para las soluciones patrón (Autores 2019).	117
Apéndice D. Registros fotográficos del laboratorio de nitratos, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.	120
Apéndice E. Valores de absorbancia y su promedio para cada muestra de suelo con su respectiva concentración de nitratos, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.	122
Apéndice F. Aplicación del modelo de crecimiento exponencial para el cálculo de la cantidad de ramas y hojas para distintas iteraciones y su acumulado, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.	123

Resumen

La presente investigación, surge del interés de conocer cómo con el estudio de los fenómenos naturales desde una perspectiva matemática y geométrica, se puede diseñar una metodología para estimar la cantidad de CO₂ capturado por la biomasa aérea de una planta de mandarina “Arrayana” mediante la relación: L-sistemas y ecuaciones diferenciales. Se identificaron las variables del L-sistema de la planta para construir su patrón de crecimiento y aplicar el modelo de crecimiento exponencial que calcula su número de ramas y hojas respecto a las iteraciones desarrolladas por la planta. Para estimar el tiempo que tarda una planta de mandarina “Arrayana” en desarrollar una iteración, se registraron durante 13 semanas las iteraciones de quince plantas de esta especie sembradas en la Universidad Santo Tomás, organizadas por edades en tres bloques que recibieron aleatoriamente cuatro tratamientos de fertilizante y uno placebo. La captura de CO₂ de las plantas se estimó al extrapolar un valor teórico de captura de CO₂ de un árbol de 15 años con su número de ramas y hojas. Durante el trabajo de campo, las plantas placebo no generaron iteraciones y los efectos de los tratamientos fueron más evidentes en el bloque B; sin embargo, las plantas que recibieron el mismo tratamiento, tienen tamaños distintos porque crecen a ritmos variados. Se estimó que una planta tarda en promedio 26,8 días en realizar una iteración; de las plantas estudiadas, la N°10 fue la que mayor captura de CO₂ realizó desde su germinación hasta la finalización de toma de datos, con 156.800E-56gr de CO₂; dado que fue la planta que culminó con mayor cantidad iteraciones, ramas y hojas. Finalmente, con los datos registrados se realizó una matriz de correlación y un modelo de regresión lineal que demostró que las iteraciones son la variable más relevante en la captura de CO₂.

Palabras clave: Dióxido de carbono (CO₂), L-sistemas, Mandarina “Arrayana”, Modelo de crecimiento exponencial.

Abstract

The present investigation, arises from the interest of knowing how with the study of natural phenomena from a mathematical and geometric perspective, a methodology can be designed to estimate the amount of CO₂ captured by the aerial biomass of a mandarin plant "Arrayana" by relationship: L-systems and differential equations. The variables of the plant's L-system were identified to construct its growth pattern and apply the exponential growth model that calculates its number of branches and leaves with respect to the iterations developed by the plant. To estimate the time it takes for an “Arrayana” mandarin plant to develop an iteration, the iterations of fifteen plants of this species planted at the Santo Tomas University were recorded for 13 weeks, organized by age in three blocks that randomly received four treatments of fertilizer and a placebo. The CO₂ capture of the plants was estimated by extrapolating a theoretical CO₂ capture value of a 15-year-old tree with its number of branches and leaves. During the field work, the placebo plants did not generate iterations and the effects of the treatments were more evident in block B; however, the plants that received the same treatment, have different sizes because they grow at varied rates. It was estimated that an average plant takes 26.8 days to perform an iteration; of the plants studied, N ° 10 was the one that captured CO₂ the most from germination to completion of data collection, with 156,800E-56gr of CO₂; given that it was the plant that culminated with the highest number of iterations, branches and leaves. Finally, with the recorded data, a correlation matrix and a linear regression model were performed, which showed that iterations are the most relevant variable in CO₂ capture.

Key words: Carbon dioxide (CO₂), L-systems, “Arrayana” mandarin, Exponential growth model.

Introducción

Una de las principales preocupaciones actuales de las entidades gubernamentales es el cambio acelerado de la temperatura global; según el último boletín de gases de efecto invernadero (GEI) de la Organización Mundial Meteorológica, durante los años (2006-2016) el incremento medio anual absoluto de CO₂ fue de 2,21ppm/año; esta elevación de los niveles de CO₂ ha sido 100 veces mayor que a finales de la última edad de hielo y que debido a su rápido crecimiento tiene el potencial para iniciar cambios impredecibles en el sistema climático, como el calentamiento global debido al aumento de la temperatura por las alteraciones generadas en los ecosistemas (World Meteorological Organization, 2017).

Teniendo en cuenta lo anterior, surge el interés de comprender la forma en que los organismos autótrofos contribuyen en la disminución de la presencia de CO₂ en la atmósfera (Velasco, Romero, González, Moreno, & Pérez, 2012). Los organismos autótrofos son organismos que sintetizan las sustancias esenciales para su metabolismo mediante sustancias inorgánicas; es decir, que no necesitan de otros seres vivos para alimentarse; se clasifican en organismos autótrofos inferiores y superiores; los inferiores están comprendidos por las algas que tienen la capacidad de realizar la fotosíntesis a pesar de no tener órganos ni tejidos verdaderos y los superiores comprenden a las plantas, estas se dividen a su vez en vasculares y no vasculares, las plantas vasculares son aquellas que contienen verdaderas raíces, tallo y hojas; a diferencia de las no vasculares (Pérez, 2014).

Específicamente las plantas actúan como sumideros de carbono (C) gracias a su principal función vital, la fotosíntesis; proceso mediante el cual las formaciones vegetales tienen la capacidad de capturar el dióxido de carbono (CO₂) y extraer el carbono de la atmósfera; a escala mundial, los ecosistemas vegetales terrestres fijan 2.000.000 toneladas/año de C; siendo este un motivo para que los árboles puedan considerarse un mecanismo natural para reducir el CO₂ atmosférico y mitigar su incremento (Espada, 2013). Por este motivo, el presente trabajo se centra en la relación existente entre los L-sistemas (fractales) y las ecuaciones diferenciales para estimar la captura de CO₂ por parte de la biomasa aérea de la planta de mandarina “Arrayana”.

El desarrollo del trabajo está establecido en tres fases, la fase 1 es la construcción del L-sistema en el que a partir de la observación del crecimiento de algunas plantas de esta especie, se

determinan las variables que permiten modelar el patrón de crecimiento de la planta y dan origen a las condiciones iniciales necesarias para aplicar el modelo matemático de crecimiento exponencial de la fase 2, en la que se calcula el número de ramas y hojas de la planta respecto a las iteraciones; finalmente en la fase 3, mediante trabajo de campo en la sede Loma Linda de la Universidad Santo Tomás de Villavicencio, se determina el tiempo que tarda una planta de esta especie en desarrollar una iteración para relacionarlo con la cantidad de ramas y hojas obtenida en la fase dos y extrapolar el valor teórico de captura de CO₂ de una planta de mandarina “Arrayana” de 15 años de edad a cualquier etapa de vida de esta especie.

1. Planteamiento del problema

1.1. Descripción del problema

A mediados del siglo XVIII, durante la Revolución Industrial con la aparición de la máquina de vapor; las emisiones y los residuos de los procesos industriales sobrepasaron los límites de autopurificación del aire, agua y suelo, generando alteración en los ecosistemas y enfermedades en los seres humanos (Galván & Reyes, 2009).

En el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) de Colombia, las emisiones totales de CO₂ han aumentado 50.639,78Gg CO₂ eq (Gigagramos de CO₂ equivalente) desde 1990 a 2004 (IDEAM, 2010). El mismo inventario del año 2015 estableció un aumento en las emisiones de CO₂ de 9,7% con respecto a las emisiones del año 2004 (IDEAM, 2015).

La tendencia mundial del aumento del CO₂ atmosférico puede estar relacionada con procesos naturales como el ciclo natural del carbono; sin embargo, actualmente el componente humano es significativo dado que solo al ser consideradas las actividades antrópicas como el consumo de combustibles fósiles y leña para generar energía, se puede explicar dicho aumento de este gas de efecto invernadero (Caballero, Lozano, & Ortega, 2007).

En condiciones naturales, las cantidades de CO₂ son las adecuadas para llevar a cabo el efecto invernadero que el planeta necesita para mantener la temperatura promedio estable; pero el aumento del CO₂ de la atmósfera y de otros gases de efecto invernadero (GEI) como el metano, incrementan ese efecto invernadero que deriva en el calentamiento global; el cual contribuye al cambio climático (Aguilar, 2003). Sin embargo, el CO₂ es el gas de efecto invernadero más abundante debido a que representa alrededor de 2/3 de todos los tipos de GEI (ONU, 2019).

El cambio climático es considerado el mayor desafío actual debido que sus efectos son de alcance mundial; las variaciones meteorológicas amenazan la producción de alimentos, el aumento del nivel del mar incrementa el riesgo de catástrofes por inundación y las emisiones de GEI han alcanzado los niveles más altos de la historia; para abordar esta problemática, los países adoptaron el Acuerdo de París para limitar el incremento de la temperatura media mundial a un nivel inferior a los 2 °C a través del objetivo 13 de desarrollo sostenible: adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos (ONU, 2019).

Uno de los mecanismos que la economía ambiental ha utilizado para intentar mitigar las emisiones de GEI a nivel mundial son los bonos de carbono mediante los cuales los países compran los derechos de emisión a aquellos países que están por debajo de sus límites de emisión establecidos, permitiéndoles cumplir con sus respectivos límites de reducción de GEI (Manzur & Alva, 2013). Todas las emisiones y reducciones de los GEI se expresan en unidades de masa de CO₂ equivalente (IDEAM, 2015); de ahí la importancia de determinar la cantidad de CO₂ atmosférico.

El CO₂ atmosférico se reduce y mitiga naturalmente a través de su captura por parte de los organismos autótrofos; entre ellos, las plantas; por tal motivo, surge el interés de estimar la cantidad de CO₂ capturado por una planta de mandarina “Arrayana” desde una perspectiva matemática y geométrica.

Existen modelos analíticos y modelos de simulación que son construidos para hacer abstracciones de la realidad, comprender fenómenos que ocurren en la naturaleza, su funcionamiento y predecir su comportamiento (Orlandoni Merli, 1997). El presente trabajo relaciona los L-sistemas como modelo de simulación y las ecuaciones diferenciales como herramienta para establecer modelos analíticos de crecimiento exponencial, con la finalidad de desarrollar una metodología que a través de la descripción del crecimiento de las plantas permita estimar su captura de CO₂.

A pesar de la relación que existe entre los modelos de simulación y los modelos analíticos para describir fenómenos de la naturaleza, son escasas tanto las evidencias que muestran que a partir de la relación entre L-sistemas y modelos matemáticos de crecimiento exponencial, se pueda estimar la cantidad de CO₂ capturado por una planta; como los estudios de estimación de captura de CO₂ para cualquier etapa de la vida de la planta, dado que las investigaciones en las que se estima la captura de CO₂ de diferentes especies, usan otras metodologías que arrojan resultados solo en el tiempo real de la planta al momento del estudio; por estos motivos, se pretende diseñar una metodología que permita relacionar estos dos modelos para determinar el CO₂ capturado en cualquier etapa de vida de la planta de mandarina “Arrayana”.

1.1.1. Formulación en torno al problema.

A partir de la descripción de la problemática anterior se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo estimar la cantidad de dióxido de carbono capturado por parte de una planta de mandarina “Arrayana” empleando como herramienta la relación entre L-sistemas (fractales) y modelos de crecimiento exponencial dados por ecuaciones diferenciales?

1.2.Hipótesis

1.2.1. Hipótesis de investigación (Hi).

La captura de CO₂ de una planta de mandarina “Arrayana” se puede estimar a partir de la extrapolación de un valor teórico de captura de CO₂ de una planta de esta especie, conociendo el tiempo que tarda la planta en realizar una iteración y la cantidad de ramas y hojas que tiene la planta en cada una de las iteraciones que desarrolla.

1.2.2. Hipótesis nula (Ho).

La captura de CO₂ de una planta de mandarina “Arrayana” no se puede estimar a partir de la extrapolación de un valor teórico de captura de CO₂ de una planta de esta especie, conociendo el tiempo que tarda la planta en realizar una iteración y la cantidad de ramas y hojas que tiene la planta en cada una de las iteraciones que desarrolla.

1.2.3. Hipótesis alternativa (Ha).

La captura de CO₂ de una planta de mandarina “Arrayana” se puede estimar sin extrapolar un valor teórico de captura de CO₂ de una planta de esta especie, conociendo el tiempo que tarda la planta en realizar una iteración y la cantidad de ramas y hojas que tiene la planta en cada una de las iteraciones que desarrolla.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Estimar la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) capturado por parte de la biomasa aérea de una planta de mandarina “Arrayana” a partir de la relación entre L-sistemas y ecuaciones diferenciales.

2.2. Objetivos específicos

- Establecer el patrón de crecimiento de la planta de mandarina “Arrayana” a través de las variables del L-sistema incorporando las funciones iteradas dadas por los fractales.
- Aplicar un modelo matemático de crecimiento exponencial con ecuaciones diferenciales para calcular la biomasa aérea de la planta en diferentes iteraciones.
- Determinar la relación existente entre el modelo matemático y los tiempos reales de crecimiento de la biomasa aérea, mediante trabajo de campo para la estimación del CO₂ capturado por la planta.

3. Justificación

Una manera natural de mitigar la cantidad de dióxido de carbono es a través de los árboles, ya que estos actúan como un sumidero de carbono al realizar su proceso de fotosíntesis capturando el carbono en forma de CO₂ de la atmósfera (Domínguez, 2016); teniendo en cuenta esto, los bosques son los ecosistemas terrestres que capturan más carbono y por ende, los que más disminuyen el efecto invernadero en la atmósfera debido a que son la cobertura vegetal con mayor cantidad de biomasa acumulada (Borrero, 2012).

Desde años atrás, se ha tenido la estrategia potencial de reverdecer las áreas urbanas y aumentar los beneficios que las vegetaciones brindan como sumideros de carbono y su influencia sobre la calidad del aire; ya que es común que en las ciudades falten áreas verdes que permitan disfrutar de este servicio ecosistémico de captura de CO₂ y de su mecanismo de mitigación y adaptación al calentamiento global (Domínguez, 2016).

Bajo este supuesto, esta investigación resulta innovadora dado que pretende dar a conocer cómo con el estudio de los fenómenos naturales desde una perspectiva matemática y geométrica, se puede estimar la cantidad de CO₂ capturado por la biomasa aérea de una planta vascular de mandarina “Arrayana” para cualquier etapa de su vida; a través de la relación entre los L-sistemas (fractales) y los modelos matemáticos.

La mandarina “Arrayana” fue escogida debido a que tiene una buena adaptación a diferentes condiciones climáticas y esto ha generado una tendencia de cultivo de los cítricos a escala mundial, siendo más productivos en condiciones tropicales cerca al Ecuador; lo cual favorece a Colombia por su ubicación, siendo este un país que aprovecha las condiciones climáticas, especialmente en Cundinamarca, Boyacá y Meta para cultivar la mandarina “Arrayana”, que por ser de origen colombiano y por su adaptación al trópico bajo, en los llanos orientales del país la citricultura depende fundamentalmente de esta especie y gracias a su variedad disponible es de fácil acceso, observación y estudio (Villalba, Herrera, & Orduz, 2013).

Así mismo, el árbol de mandarina “Arrayana” fue escogido como objeto de estudio, ya que es importante reconocer sus funciones ecosistémicas debido a que un árbol de esta especie (raíz, ramas, hojas, tallos, frutos y tronco) absorbe 31.101 g CO₂ y asimila 8.482 g C anualmente; estos valores de absorción y asimilación por árbol son superiores a los de plantas herbáceas como

tomate, pimiento, sandía, melón, lechuga y algunos cereales como avena, cebada y trigo; gracias a que el árbol posee características más frondosas, con mayor superficie foliar que derivan en un mayor potencial de captación de CO₂ (Mota, Alcaraz, Iglesias, Martínez, & Carvajal, 2011).

Es importante resaltar que la metodología aplicada en el presente trabajo que relaciona los L-sistemas (fractales) y modelos matemáticos de crecimiento exponencial (ecuaciones diferenciales), puede ser replicada y adaptada a otras especies vegetales, no solamente para la estimación de captura de CO₂ sino también para el estudio de otros servicios ecosistémicos, así como la estimación de bonos de carbono. En consecuencia, esta investigación puede ser un punto de partida para la realización de futuros estudios basados en comparaciones de reducción de CO₂ entre diferentes especies y servirá como referente teórico para algunas instituciones con intereses ambientales en la toma de decisiones sobre posibles escenarios de reducción del CO₂ presente en la atmósfera.

Las ecuaciones diferenciales son de gran importancia en las problemáticas ingenieriles porque la mayoría de ellas se reducen a la solución de tales ecuaciones que requieren de técnicas como la modelación y la simulación para ser aplicadas en diversos campos de la ingeniería; por ejemplo en el crecimiento de poblaciones, los cálculos para la construcción de dispositivos radiotécnicos o maquinaria eléctrica, el cálculo de las trayectorias de los proyectiles, la investigación del curso de una reacción química o de la estabilidad de aeronaves (Avila, 2019).

4. Alcance

El desarrollo de la propuesta de investigación se llevó a cabo en el Departamento del Meta, el cual está localizado en la región central del país y cuenta con una extensión de 85mil Km²; su principal fuente de desarrollo económico es la explotación de hidrocarburos, seguida de la ganadería de extensión y la agricultura con cultivos de cítricos, palma de aceite, yuca, arroz, plátano, entre otros (Gobernación del Meta, 2015). Específicamente el estudio se desarrolló en el campus Loma Linda de la Universidad Santo Tomás de Villavicencio - Meta (Figura 1).

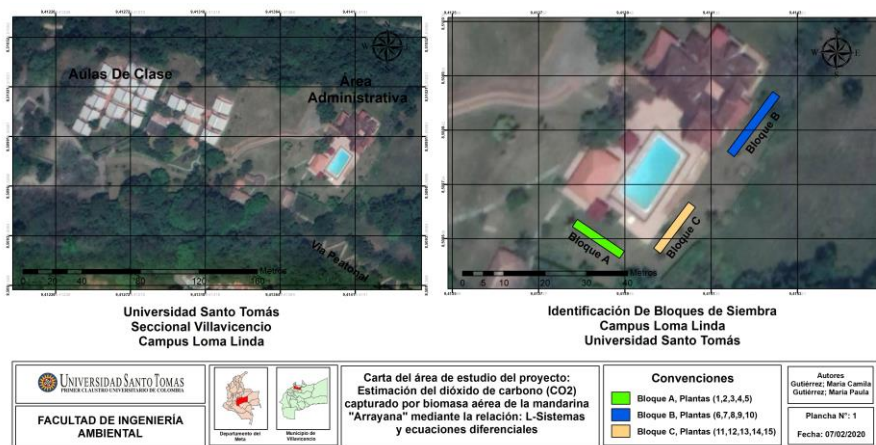


Figura 1. Área de estudio del proyecto, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.

4.1. Pertinencia social

Los resultados de la investigación tienen un impacto significativo en los citricultores debido a que el conocimiento del CO₂ capturado por parte de una planta de mandarina "Arrayana", les permitirá determinar qué tanto CO₂ está capturando un cultivo completo para que adicional a la comercialización de los frutos, que es la principal actividad económica derivada de este cultivo; consideren la venta de bonos de carbono a empresas en la región que necesiten compensar su emisión de CO₂ a la atmósfera. Es importante destacar que el Meta es el tercer departamento del país con mayor cantidad de área sembrada de cítricos, especialmente en los municipios de Lejanías, San Juan de Arama y Villavicencio (Minagricultura, 2018); de los cuales, el 20% corresponde a cultivos de mandarina (Mateus & Pulido, 2010) y 95% de ellos a la especie "Arrayana" (Orduz & Cagua, 2011).

5. Antecedentes

Los estudios de la estimación de CO₂ a partir de la relación de los L-sistemas (fractales) y modelos matemáticos de crecimiento exponencial son muy escasos; sin embargo, se han realizado estudios preliminares que abordan el tema de la estimación de captura de CO₂ en especies vegetales que emplean diferentes metodologías (directas e indirectas):

En España, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas en el año 2011, determinó la tasa de captación de CO₂ anual por plantas individuales de los cultivos más representativos de Murcia en árboles cítricos (mandarina, naranja y limón) de 15 años de edad; teniendo en cuenta tanto los datos de producción de biomasa total anual conformada por parte aérea y raíz en una relación 70/30, respectivamente; como el contenido de carbono estimado en un analizador elemental de NC-Thermo Finnigan de sub-muestras de tallos, hojas, raíces y frutos recolectadas de forma destructiva, obteniéndose mayores valores de captura de CO₂ en el limonero (Mota, Alcaraz, Iglesias, Martínez, & Carvajal, 2011).

En el año 2014, se realizó una investigación en la que se analizaron las diferentes metodologías existentes realizadas en México y otros países para determinar la biomasa de carbono de especies forestales de diversos ecosistemas y determinar cuál de ellas se adapta mejor a la diversidad de especies y condiciones del sitio; identificaron las metodologías más utilizadas y las clasificaron en método directo (a partir de submuestras) y método indirecto (ecuaciones alométricas, imágenes satelitales y factores de expansión) y con base en esto definieron que es recomendable utilizar el método directo, por su precisión y trabajo en campo; el cual se mejora al incluir todos los compartimientos del árbol (ramas, follaje, raíz, tronco) y del sitio (suelo, mantillo, necromasa, herbáceas y arbustos) (Ruiz, Rodríguez, Leyva, & Enríquez, 2014).

Este mismo año, Claudia Páez en su estudio estimó la capacidad de captura de carbono de la biomasa forestal aérea de las especies más representativas de la Reserva Forestal Protectora El Malmo, mediante un método indirecto que consiste en utilizar ecuaciones alométricas o factores de expansión; para esto se hizo un inventario forestal de las especies leñosas y se recolectaron de estas las muestras vegetales; adicional se hizo la medición a la altura del pecho, la identificación y representatividad de las especies recolectadas, así como el cálculo del índice de nivel de

importancia y finalmente, la aplicación del método indirecto para hacer la conversión de biomasa aérea a carbono y posteriormente de carbono a CO₂ equivalente capturado (Páez, 2014).

Para el año 2016, en la Universidad de Caldas se desarrolló una investigación que mediante un método no destructivo estimó la biomasa aérea, el contenido de carbono y la tasa de producción de hojarasca de las especies maderables Mure, Pendare y Arenillo blanco, de un área de bosque primario de Barrancominas (Guainía, Colombia); la estimación del contenido de carbono se hizo de forma indirecta ya que aproximadamente el 50% de la biomasa vegetal corresponde al carbono, se multiplicó la biomasa total (BT) por el factor 0,5 en ausencia de información específica (Quiceno, Tangarife, & Álvarez, 2016).

La estimación de la captura del CO₂ es de gran importancia, ya que este valor puede ser utilizado para la venta de bonos de carbono y puede promover la conservación de los bosques; en el año 2012, en la llanura amazónica peruana se desarrolló un estudio en el que se determinó el carbono almacenado por medio de ecuaciones alométricas (método indirecto) de tres formaciones vegetales para ser valorizado como bonos de carbono; la estimación del total de carbono acumulado por estas tres formaciones vegetales se valorizó en alrededor de 11 millones de dólares americanos (Martel & Cairampona, 2012).

Otros estudios han usado los fractales para estudiar el crecimiento de las plantas; en el año 2017, Yeniffer Veliz y Reynolds León diseñaron un modelo 3D de la planta *Capsicum annuum* a través de la geometría fractal para su uso en simuladores de robots agrícolas; el análisis fractal se realizó por medio del método Conteo de Cajas y la presencia de una relación lineal permitió clasificar la planta como un fractal, para elaborar un modelo que describe su crecimiento mediante las características fractales de los L-sistemas y a partir de este, generaron un algoritmo que se utilizó en la herramienta Lparser para simular el crecimiento de la planta en diferentes etapas y visualizarla a través de un visor 3D Web (Veliz & León, 2017).

Algunos estudios se enfocan en la mandarina “Arrayana” desde diversos puntos de vista, entre ellos, el fenológico; en el piedemonte llanero, se estudió la relación entre las variables climáticas de esta zona, específicamente la precipitación mensual durante un año y las respuestas fisiológicas de crecimiento y desarrollo en árboles de mandarina “Arrayana” de 7 años de edad, considerando que la precipitación pluvial es el principal factor climático que determina el crecimiento y desarrollo de los cítricos en el trópico; obteniendo tres picos de brotación, el primero en los meses

de marzo y abril, el segundo en julio y agosto y el último en septiembre y octubre (Orduz, Monroy, & Fisher, 2010).

6. Marco de referencia

6.1. Marco teórico

- Modelos de simulación y modelos analíticos

Un modelo de simulación es la representación de un sistema, objeto o idea de una manera diferente, ya que puede ser una réplica exacta pero en una escala diferente o inclusive puede simbolizar una abstracción de las propiedades principales de un objeto; este tipo de modelos permite entender el funcionamiento de un sistema y predice los comportamientos del mismo a través de la postulación de teorías o hipótesis, se desarrollan a partir de la simulación dado que imitan la realidad a través de la experimentación, la cual puede ser mediante trabajo de campo o de laboratorio; en cuanto a la simulación se puede ejecutar de forma teórica, conceptual o sistémica; a pesar de esto, los modelos de simulación se emplean únicamente en los problemas que debido a su complejidad se impide resolverlos o describirlos mediante ecuaciones matemáticas ordinarias (Ruales, 2009).

Sin embargo, un modelo analítico es una construcción matemática simplificada y abstracta, que también está relacionada con la realidad con el fin de entender el comportamiento de un objeto, proceso o situación; este tipo de modelo utiliza diferentes variables, formulaciones, resoluciones y expresiones para generar una solución particular y en el futuro funcionar como soporte para otras aplicaciones y teorías (Salett & Hein, 1996).

- Lenguaje fractal: sistemas de Lindenmayer

El término fractal fue introducido por Benoit Mandelbrot al observar que los objetos en realidad no son perfectos como lo demuestra la geometría Euclidea; un fractal es un objeto geométrico que está compuesto de elementos, tamaño y orientación variable pero que conserva un aspecto similar; si un objeto fractal se aumenta o se disminuye, los elementos resultantes tienen el mismo aspecto independiente de la escala utilizada; estos elementos tienen una estructura geométrica recursiva debido a que son un mosaico del elemento principal, los detalles más pequeños de un objeto tienen relación con sus propiedades globales; siendo esta la propiedad de los fractales conocida como autosimilaridad (Álvarez, 2005).

Adicional a la autosimilaridad, los fractales tienen otra característica fundamental que es la dimensión fractal o también llamada dimensión de Hausdorff, la cual hace referencia a la dimensión no entera que los objetos fractales poseen como su capacidad para rellenar el espacio que lo contiene; esta dimensión puede tomar valores continuos de los números reales entre 0 y 3 (Álvarez, 2005). Se define de la siguiente manera:

$$D = \frac{\ln N}{\ln \frac{1}{r}}$$

Ecuación 1. *Dimensión fractal (Rubiano, 2002).*

Donde; D es la dimensión fractal, N es la cantidad de unidades o segmentos que forman el objeto y $r = 1/N$, es la razón en que se divide el objeto fractal (Rubiano, 2002).

La forma de un fractal inicia con un objeto como línea, punto, segmento, etc., que es alterado de manera constante a través de la aplicación de reglas descritas de forma matemática o por medio de palabras; el proceso de repetir dichas reglas un sin número de veces se denomina iteración, principio fundamental bajo el cual operan los fractales (Bedoya González, 2016).

Esta geometría fractal ha sido utilizada en la modelación de paisajes naturales realistas, así como en el diseño y planificación de ciudades, interacción de organismos y ecosistemas, redes neuronales, representación de estrellas, burbujas, lluvia, etc. (Campos Muñoz, 2011).

Para modelar el crecimiento y la morfología de varios organismos implementando los fractales, los sistemas de Lindenmayer o también llamados L- sistemas surgieron como el conjunto de símbolos y reglas que conforman un lenguaje que permite modelar el crecimiento de las plantas; el proceso para generar un L-sistema es: (i) observar el desarrollo de los organismos que se quiera modelar, (ii) identificar los tipos de elemento que interactúan, (iii) identificar las normas de desarrollo de cada elemento y (iv) considerar características externas, influencia del entorno, competencia por sobrevivir (Campos Muñoz, 2011).

Los L-sistemas se caracterizan por ser una técnica basada en la reescritura o la recursividad de los procesos; dado que modela objetos de naturaleza compleja mediante reglas de reescritura o de producción, reemplazando repetidamente “partes” de un objeto inicial simple, llamado axioma; como resultado de la cadena de caracteres que se generan, se obtiene una representación gráfica (Bedoya González, 2016).

- Modelo de crecimiento exponencial dado por las ecuaciones diferenciales

Los modelos de crecimiento son modelos analíticos diseñados con la finalidad de describir el crecimiento de las poblaciones y pronosticar el tamaño de la población en estudio al cabo del tiempo; estos modelos tienen en cuenta una propiedad de las poblaciones denominada tasa de crecimiento exponencial que considera parámetros demográficos básicos (nacimiento, muertes, inmigraciones y emigraciones) (Valverde, Cano, Meave, & Carabias, 2005).

Uno de los modelos de crecimiento es el modelo matemático de crecimiento exponencial dado por las ecuaciones diferenciales que permite calcular el número de ramas y hojas con respecto a la iteración ($X(i)$) contemplando los nacimientos y muertes de la población mediante una constante de proporcionalidad (Zill, 2009).

A continuación, se describe la solución del modelo matemático por medio del método de separación de variables: $X(i + \Delta i) = X(i) + N - M$. Sea, X la cantidad de ramas y hojas que hay en determinada iteración i , N nacimientos y M muertes de ramas y hojas.

Ecuación 2. *Modelo matemático de crecimiento exponencial (Zill, 2009).*

$$N = NX(i)\Delta i$$

$$M = MX(i)\Delta i$$

$$X(i + \Delta i) = X(i) + NX(i)\Delta i - MX(i)\Delta i$$

$$X(i + \Delta i) = X(i) + (N - M) X(i)\Delta i$$

$$X(i + \Delta i) - X(i) = (N - M) X(i)\Delta i$$

$$*K = (N - M)$$

$$\frac{X(i + \Delta i) - X(i)}{\Delta i} = kX(i)$$

$$\lim_{\Delta i \rightarrow 0} \frac{X(i + \Delta i) - X(i)}{\Delta i} = kX(i)$$

$$P'(i) = kX(i)$$

$$\frac{dX}{di} = kX \rightarrow \frac{dX}{X} = kdi$$

$$\ln(X) = ki + c$$

$$X(i) = ce^{k(i)}$$

Ecuación 3. *Solución general del modelo de crecimiento exponencial (Zill, 2009).*

Donde, i corresponde al número de iteraciones, c a la constante de integración y k a la constante de proporcionalidad.

- Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación

Los experimentos son investigaciones basadas en un conjunto particular de circunstancias limitadas a un protocolo específico de observación y de evaluación de las implicaciones de las observaciones resultantes dado que el investigador es quien determina y controla los protocolos del experimento, de acuerdo a lo que desea evaluar y probar; que en la mayoría de los casos, es desconocido (Kuehl, 2001).

Los experimentos pueden ser de tipo comparativo porque establecen más de un conjunto de circunstancias que son comparadas entre sí; estas circunstancias creadas en los experimentos reciben el nombre de tratamientos y al ser aplicados en el sujeto de estudio o también llamado unidad experimental; se comparan los efectos obtenidos y sus alteraciones determinadas por la varianza del error experimental, la cual puede ser estimada mediante la replicación y la aleatorización (Kuehl, 2001).

Una forma de reducir el error experimental es a través de la bloquización dado que permite un control local del ambiente, agrupando las unidades experimentales de forma homogénea de acuerdo a un factor que las relaciona, con la finalidad de tener uniformidad y evitar que las diferencias al comparar los tratamientos tengan grandes discrepancias (Kuehl, 2001).

Las circunstancias creadas adecuadamente en los tratamientos responden a una hipótesis de investigación y mejora la comprensión de los aspectos químicos, sociales, físicos y biológicos de la investigación; para evaluar en su totalidad las consecuencias de la hipótesis se requieren tratamientos adicionales como el tratamiento de control o placebo, el cual consiste en una unidad a la que no se le aplica el tratamiento activo pero es procesada del mismo modo que los otros tratamientos (Kuehl, 2001).

Uno de los elementos más fundamentales en un proceso investigativo es la observación porque le permite al investigador obtener datos; existen dos clases de observación según la intencionalidad, la primera es observar científicamente, la cual se centra en observar con un objetivo; la segunda es observar sin intención y sin previa preparación, llamada observación no científica (Díaz, 2011). Dentro de la observación científica se encuentra la modalidad de

observación estructurada y no estructurada, estas se diferencian principalmente por el uso o no uso de elementos técnicos como: cuadros, tablas, fichas, diagramas, etc. (Díaz, 2011).

- Espectrofotometría UV-visible para determinar las concentraciones de compuestos

La espectrofotometría UV-visible es una técnica analítica utilizada para determinar la concentración de un compuesto en solución y caracterizar las biomoléculas; su funcionamiento está basado en la capacidad de las moléculas para absorber tanto las radiaciones electromagnéticas, como la cantidad de luz absorbida que depende linealmente de la concentración (Abril, y otros, 2014).

La región UV es una región con un rango de longitudes de onda de 195 a 400nm, que permite determinar cualitativa y cuantitativamente los compuestos orgánicos porque presentan su máxima absorbancia en esta región. La absorbancia (A) está relacionada con la cantidad de luz absorbida por la muestra a diferentes valores de longitud de onda (λ) y es directamente proporcional a la concentración de la solución; es decir que, a mayor cantidad de moléculas, mayor será la interacción de ellas con la luz (Abril, y otros, 2014).

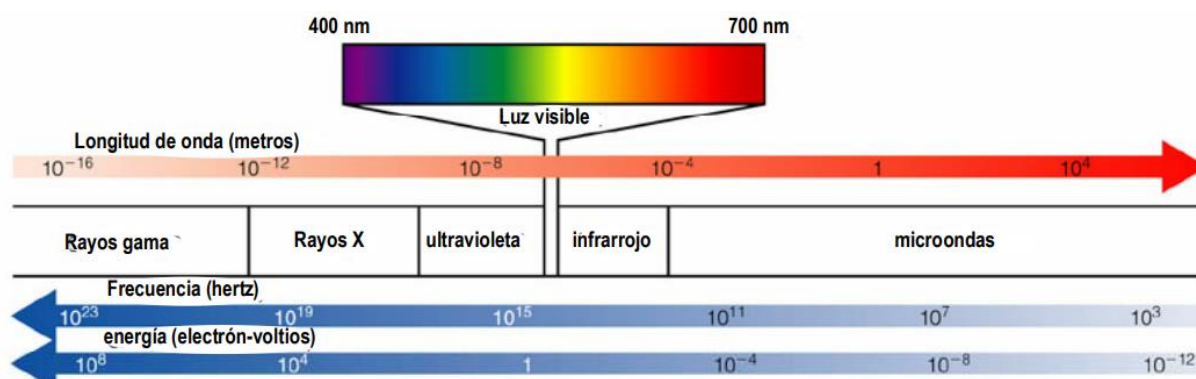


Figura 2. Longitudes de onda para los diferentes espectros (Abril, y otros, 2014).

El equipo empleado para hacer este tipo de medidas es el espectrofotómetro; en el cual se selecciona la longitud de onda de la luz que pasará por la solución y se mide la cantidad de luz absorbida por esta, para obtener el valor de absorbancia es necesario medir la absorbancia del disolvente con el que se va a trabajar, también llamado blanco, al cual se le asigna un valor de cero que garantiza igualdad en la intensidad incidente y transmitida; para proceder a introducir en la celdilla la cubeta con la muestra y leer la absorbancia de ésta (Abril, y otros, 2014).

La lectura se hará a diferentes longitudes de onda frente al blanco realizado con el mismo disolvente de la muestra a caracterizar, para obtener el valor de λ al que el compuesto evidencia la mayor absorbancia ($\lambda_{m\acute{a}x.}$) y con este valor poder calcular la absorbancia de otras soluciones del compuesto a diferentes concentraciones, para construir su respectiva curva de calibración en la que se representa en el eje X de la gráfica los valores de absorbancia y en el eje Y, los valores de concentración; permitiendo determinar cualitativa y cuantitativamente el compuesto (Abril, y otros, 2014).

- Métodos para el análisis estadístico

Uno de los software más utilizados y conocidos para la realización de análisis estadísticos es el SPSS “Paquete estadístico para ciencias sociales”, se caracteriza por su capacidad de manejar grandes bases de datos y su interfaz sencilla (González J. , 2009).

Para el análisis estadístico de las relaciones entre las variables de una investigación usualmente es utilizada la correlación lineal de Pearson; la cual calcula el grado de relación lineal entre dos variables, es decir, si su dirección es positiva o negativa y si su fuerza de correlación es fuerte, débil o nula; los valores de la correlación fluctúan entre -1 y 1, dónde los valores próximos a 1 indican una fuerte correlación positiva y los valores cercanos a -1 demuestran una relación negativa fuerte (González J. , 2009); los rangos de los valores que se utilizan para establecer la fuerza de la relación entre las variables se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla 1. Significado del rango de correlación.

Rango de correlación	Significado
$r = 1$	Correlación Perfecta
$0,8 < r < 1$	Correlación muy Alta
$0,6 < r < 0,8$	Correlación Alta
$0,4 < r < 0,6$	Correlación Moderada
$0,2 < r < 0,4$	Correlación Baja
$0 < r < 0,2$	Correlación Muy Baja
$r = 0$	Correlación Nula

Nota: * Descripción de los rangos de correlación por (González J. , 2009).

A partir de la correlación lineal de Pearson se puede realizar la correlación parcial; la cual se caracteriza por eliminar el efecto de una variable al conjunto de variables sin alterar el tamaño muestral original y aplicando correlaciones simples y de primer orden; este procedimiento se puede llevar a cabo en el programa estadístico SPSS, allí se ingresan las variables que se desean relacionar y se selecciona la variable a la que se le desea eliminar el efecto a través de un control (Camacho, 2010).

Otra forma de medir estadísticamente las relaciones entre las variables es por medio del modelo de regresión lineal, el cual busca predecir una variable a partir del conocimiento de las otras; la variable que se desea predecir es considerada la dependiente y se denota con la letra Y , las otras variables permiten modelar o predecir, catalogadas como independientes y se representan con los símbolos $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$. (González J. , 2009); el modelo se plantea de la siguiente manera:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_nX_n + \varepsilon$$

Ecuación 4. *Modelo de regresión lineal (González J. , 2009).*

La letra ε corresponde al error aleatorio, el cual representa las desviaciones de los valores verdaderos de Y contra los valores esperados de Y ; los valores de $B_0, B_1, B_2 \dots B_n$ se consideran parámetros del modelo y pertenecen a los coeficientes no estandarizados; el software SPSS permite generar este modelo estadístico, de manera que muestra cada uno de los valores de los parámetros y permite verificar la validez del mismo.

6.2. Marco conceptual

- Calidad del aire

El aire es una combinación compleja entre vapor de agua, oxígeno, nitrógeno y gases como CO₂, metano, argón, hidrógeno y helio (Matus & Lucero, 2002); su calidad ha sido afectada por las diversas modificaciones en la composición de la atmósfera, especialmente por el aumento de la concentración los gases de efecto invernadero, producto de actividades antropogénicas y por causas naturales; las afectaciones en la atmósfera y por ende en la calidad del aire, pueden producirse a escala local o regional, generando repercusiones nocivas en ecosistemas y en la salud humana, por otra parte, puede ser a escala global, ocasionando cambios en el clima dado que tiene influencia en el balance radiactivo terrestre (Querol, 2008).

En consecuencia, la contaminación del aire es actualmente una de las problemáticas ambientales más severas a nivel mundial, dado que modifica el ambiente por la adición de agentes biológicos, químicos y físicos, en cantidades elevadas a las naturales, provocando daño en los recursos naturales, desequilibrio ecológico y afectaciones en la salud humana de cualquier sociedad, sin importar el nivel de desarrollo económico (Romero, Diego, & Álvarez, 2006).

- Gases de efecto invernadero (GEI)

Los GEI son compuestos que aumentan la temperatura de la baja atmósfera significativamente a pesar de estar presentes en concentraciones muy pequeñas en la atmósfera, esto se debe a que tienen la capacidad de absorber y remitir radiación infrarroja; el vapor de agua es el causante de tres cuartas partes del efecto invernadero natural (IDEAM, 2015). Pueden clasificarse de acuerdo a su tiempo de vida dado por la rapidez en que los procesos físicos, químicos y biológicos pueden removerlos; pueden ser GEI de larga vida y GEI de corta vida; los GEI de larga vida también llamados GEI directos son el CO₂ (tiempo de vida mayor a 100 años), N₂O (121 años), CH₄ (12 años) y clorofluorocarbonos (CFCs) (entre 45 y 1020 años) y los GEI de corta vida se resumen en ozono troposférico (O₃), proveniente de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COVs) (IDEAM, 2015).

Los GEI de larga vida (CO₂, N₂O, CH₄ y CFCs) son considerados como contaminantes por la Corte Suprema de los EE.UU. desde el año 2007, debido a que estos han superado sus niveles de concentración normales y a pesar de no tener efectos tóxicos directos, como si los tienen los contaminantes considerados de criterios (material particulado, CO, O₃, SO₂, NO₂); si los generan de forma indirecta, a través de la perturbación del clima; todas las emisiones y reducciones de los GEI se expresan en unidades de masa de CO₂ equivalente (IDEAM, 2015).

- Dióxido de carbono (CO₂)

El CO₂ es el cuarto componente más común en la atmósfera, es considerado uno de los gases variables atmosféricos más influyentes en el efecto invernadero y por ende, uno de los más importantes en el cambio climático por su efecto radiactivo (Rojas, 1995). Este gas tiene fuentes de emisión tanto naturales como antropogénicas; dentro del ciclo natural del carbono, el CO₂ participa en múltiples procesos biológico (Benavides & León Gloria, 2007); su concentración en la atmósfera ha ido aumentando de forma constante debido al uso de combustibles fósiles como

fuentes de energía en su mayoría, además de otras fuentes como medios de transporte, procesos industriales y edificios residenciales y comerciales (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2005).

- Captura de carbono

El CO₂ atmosférico es capturado e incorporado a los procesos metabólicos del bosque gracias al proceso de la fotosíntesis de las plantas; proceso en el cual se generan materias primas como la glucosa, aparece el follaje, ramas y demás estructuras que permiten el desarrollo del árbol. Cuando los árboles fijan en sus estructuras vivas el dióxido de carbono atmosférico pasan a acumularlo en su biomasa y la parte restante, la transfieren al mantillo y al suelo por descomposición, constituyéndose así las reservas de carbono. La edad de las plantas se convierte en un factor principal que influye en la capacidad de los ecosistemas forestales para almacenar carbono en forma de biomasa aérea (Paipa & Triana, 2018).

La captura de dióxido de carbono de los árboles y su posterior almacenamiento de carbono, es un servicio ambiental que valoriza la incorporación de especies arbóreas en sistemas agroforestales; para la estimación de la cantidad de carbono almacenado para biomasa aérea generalmente es asumido el valor de la fracción de carbono en materia seca en un 50%, sin diferenciar especies (De Petre, Karlin, Ali, & Reynero, 2016).

- Biomasa de los árboles

Ante el notorio cambio climático global, las plantaciones forestales han adquirido mayor importancia, sobre todo aquellas que presentan un rápido crecimiento, dado que funcionan como altos reservorios de carbono; por lo anterior, resulta importante estimar confiablemente la biomasa ya que es vital para determinar adecuadamente el potencial de captura de carbono (Rodríguez, y otros, 2012).

La biomasa forestal está definida como el peso o estimación de la materia orgánica existente por encima del suelo (biomasa aérea) o por debajo del suelo (biomasa subterránea) de determinado ecosistema forestal debido a que comúnmente se separa en componentes (tallos, ramas, hojas, corteza, raíces, hojarasca y madera muerta) (Rodríguez N., 2013). La distribución de la biomasa aérea en los árboles en sus diferentes órganos está relacionada con el manejo silvícola y las condiciones ambientales que alteran la calidad del suelo (Rodríguez, y otros, 2012).

- Calidad del suelo

A diferencia del aire y del agua, el suelo no tiene un estado “puro”, por lo tanto, no posee un estándar de referencia; las diferentes condiciones físicas, químicas y biológicas del aire y del agua son posibles de cuantificar lo que facilita la desviación con respecto a su respectivo estado puro; por otra parte, la composición química, física y biológica del suelo varía considerablemente impidiendo establecer un valor estándar para los diferentes tipos de suelos (Navarrete, Vela, López, & Rodríguez, 2011).

La calidad del suelo y sus diferentes parámetros de referencia están ligados al concepto de funcionalidad del ecosistema, debido a que se integran e interconectan los componentes y los diferentes procesos químicos, biológicos y físicos de un suelo en una determinada situación; este concepto refleja la capacidad que tiene el suelo para sostener o mejorar la productividad de los animales y las plantas, para funcionar dentro de los límites del ecosistema y para mejorar o mantener la calidad del agua y del aire (Navarrete, Vela, López, & Rodríguez, 2011).

La calidad del suelo tiene implicaciones directas con su capacidad de mantener el balance ambiental biofísico, sostener la productividad biológica y soportar la funcionalidad ecosistémica; puede ser evaluada bajo tres principios con respecto a su funcionalidad: su productividad, su salud y la calidad del ambiente biofísico; la productividad del suelo hace referencia a su habilidad de incentivar la productividad del ecosistema, la salud del suelo es su capacidad para producir alimentos nutritivos para los seres humanos y demás organismos y la calidad del ambiente biofísico destaca la capacidad del suelo para atenuar los patógenos y contaminantes ambientales incluyendo los servicios ecosistémicos ofrecidos por el suelo (recarga de acuíferos, reservorio de carbono, etc.) (Navarrete, Vela, López, & Rodríguez, 2011).

- Parámetros fisicoquímicos del suelo influyentes en el crecimiento de las plantas

Los tres principales parámetros fisicoquímicos del suelo que influyen en el crecimiento de las plantas son el pH, los nitratos y la humedad del suelo descritos a continuación:

El potencial de hidrógeno (pH) es una medida de acidez o basicidad que se expresa en términos de concentración de iones hidronio, presente tanto en los líquidos como en los suelos, en estos últimos dependiendo de los niveles de acidez se pueden concentrar los micronutrientes y macronutrientes indispensables para el crecimiento de las plantas; para determinar el nivel de pH de un suelo se usa la escala de pH, la cual va desde 0 a 14, los suelos que presentan niveles

superiores a 7 son considerados como básicos o dulces, los de niveles inferiores a 7 son ácidos o amargos y los suelos con valores 7 son neutros; las variaciones en los niveles de pH de los suelos suceden cuando los mismos son sometidos a actividades humanas como la agricultura, en la que usualmente para aumentar la calidad y producción de los cultivos se aplican herbicidas con altos componentes químicos (Rivera, Sánchez, & Domínguez, 2018).

Dado que dependiendo del nivel de acidez de los suelos se puede favorecer o no al desarrollo de la plantas, un suelo acidificado reduce el crecimiento de las plantas ya que presenta un baja disponibilidad de nutrientes como, magnesio, calcio, fósforo y potasio, permitiendo la solubilidad de elementos tóxicos como el manganeso y el aluminio; cuando existe toxicidad en suelos por aluminio, se presentan efectos directos en la transferencia de los iones y el agua en las membranas celulares de la raíz, afectando su metabolismo y obstruyendo la alimentación de los nutrientes requeridos para el desarrollo de las plantas (Rivera, Sánchez, & Domínguez, 2018).

En los organismos vegetales la disponibilidad del nitrógeno es esencial para su crecimiento y desarrollo; sin embargo, este nutriente en ambientes naturales está disponible en bajas cantidades, lo que hace necesario la incorporación de fertilizantes nitrogenados al suelo para la producción de cultivos vegetales que necesiten altos rendimientos (Vega, 2015).

El nitrógeno, fisiológicamente tiene relevancia en las plantas por sus efectos en el crecimiento y vigor de las hojas y su tiempo de floración; adicional, es un factor importante en su estado nutricional por la resistencia o susceptibilidad a patógenos (Vega, 2015). El nitrógeno es absorbido por las plantas en forma de nitrato (NO₃) o amonio (NH₄), eso varía de acuerdo a las preferencias de las especies vegetales (Balta, y otros, 2015); su forma predominante es definida por el contenido de humedad del suelo (Muñoz, 2009).

El agua es el recurso más abundante que las plantas necesitan para crecer y desarrollarse; sin embargo, es el más limitante debido a que estas requieren absorber un gran volumen de agua durante su ciclo de vida; del cual solo el 3% es absorbido y usado en la fotosíntesis y otros procesos metabólicos y el 97% restante es utilizado para transportar desde la raíz a las hojas los nutrientes disueltos (Muñoz, 2009).

El contenido de humedad del suelo es un factor limitante para el crecimiento vegetal y el rendimiento de las cosechas, especialmente a edades tempranas (Córdoba, Vargas, López, & Muñoz, 2011). Una adecuada humedad en el suelo permite un buen desarrollo en las funciones de la planta y una ganancia de biomasa, por el contrario la deficiencia de agua disminuye el

rendimiento y altera los procesos fisiológicos de la planta, afectando su crecimiento, morfología, anatomía y la bioquímica de los tejidos vegetales (May, Pérez, Ruiz, Caamal, & García, 2011).

6.3.Marco legal

Tabla 2. *Normatividad legal.*

Norma	Descripción
Constitución política de Colombia 1991 “artículo 79”	Derecho a gozar de un medio ambiente sano.
Decreto 298 de 2016	Por el cual se establece la organización y funcionamiento del Sistema Nacional de Cambio Climático y se dictan otras disposiciones.
Resolución 0650 de 2010	Por la cual se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire.
Resolución 2154 de 2010	Por la cual se ajusta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire adoptado a través de la Resolución 650 de 2010 y se adoptan otras disposiciones.
Resolución 2254 de 2017	Por la cual se adopta la norma de calidad de aire ambiente y se dictan otras disposiciones.

Nota: * Descripción de la normatividad que aplica para el proyecto, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.

7. Metodología

Desde el enfoque epistemológico, la presente investigación tiene una distinción gnoseológica racionalista y una distinción ontológica realista dado que usa para su desarrollo sistemas lógico-matemáticos; es decir que el enfoque es de tipo “racional-idealista”, el cual es considerado un método que responde a la necesidad de ofrecerle una fundamentación más allá de lo físico o experimental al conocimiento racional (Berríos & Brinceño , 2009).

La investigación realizada es de tipo descriptiva y exploratoria; por un lado, es descriptiva debido a que se busca detallar de manera concreta las características fundamentales del crecimiento de la planta mandarina “Arrayana”, destacando la razón en que se divide y el patrón de crecimiento de su L-sistema y por otro lado, es exploratoria dado que aunque el aumento del dióxido de carbono atmosférico es un fenómeno muy estudiado por sus impactos ambientales y la elección de árboles como sumideros de carbono también es un tema que ha tomado relevancia en la actualidad (Benítez, 2011); la metodología aplicada en este trabajo es innovadora y poco reconocida, ya que es escasa la información que se encuentra de la relación entre los L-sistemas y modelos matemáticos para la estimación del CO₂ capturado por una planta.

A continuación, se describen las fases necesarias para llevar a cabo el cumplimiento de los objetivos propuestos:

7.1.Fase 1: Construcción del patrón de crecimiento de la planta mediante los L-sistemas

7.1.1. Actividad 1: Determinación de las variables del L-sistema.

El desarrollo de la investigación partió de la observación estructurada de la distribución de las ramas y hojas de una planta de mandarina “Arrayana” ubicada en el campus Loma Linda de la Universidad Santo Tomás; este proceso permitió determinar distintas variables como estructura fractal, cantidad de segmentos en que se divide el tallo y la razón en los que se divide para así identificar su patrón de crecimiento.

Adicional, se determinó la dimensión fractal con su respectiva fórmula. Seguidamente, se modeló el patrón de crecimiento de la especie de mandarina mediante la incorporación de funciones iteradas dadas por los fractales (L-Sistemas).

7.1.2. Actividad 2: Modelamiento del patrón de crecimiento.

El patrón crecimiento de la planta de mandarina “Arrayana” se estableció considerando la variable cantidad de segmentos en que se divide el tallo de acuerdo a las siguientes instrucciones que caracterizan la construcción de un L-sistema: F significa dibujar una línea hacia adelante de cierta longitud L, el signo – es un giro hacia la izquierda en determinado ángulo, el signo + es un giro hacia la derecha en determinado ángulo y finalmente, [] significa realizar lo interno y devolverse (Rubiano, 2002).

7.2.Fase 2: Cálculo del número de ramas y hojas de la planta

7.2.1. Actividad 1: Solución del modelo de crecimiento exponencial dado por las ecuaciones diferenciales.

Para calcular el número de ramas y hojas con respecto a la iteración ($X(i)$) se aplicó el modelo matemático de crecimiento exponencial (Ecuación 2) con su respectiva solución general:

$$X(i) = ce^{k(i)} \text{ (Ecuación 3) (Zill, 2009).}$$

Para encontrar el valor de las constantes c y k , se establecieron como condiciones iniciales los datos obtenidos en la variable cantidad de segmentos en que se divide el tallo del L-sistema, hallados en la fase 1.

7.3.Fase 3: Estimación de captura de dióxido de carbono (CO₂) de la planta

7.3.1. Actividad 1: Asignación de tiempo de crecimiento a cada iteración.

Para asignar el tiempo de crecimiento a cada iteración de la planta se realizó trabajo de campo por medio de un diseño experimental, en el que se tuvo en cuenta una bloquización y un factor de

tratamiento considerando como unidad de observación 15 plantas de mandarina “Arrayana” sembradas de forma lineal, conservando una distancia de 5 m entre cada una, en el campus Loma Linda de la Universidad Santo Tomás, para garantizar las mismas condiciones de crecimiento; a las cuales se les realizaron registros periódicos del tiempo que tardan las plantas en desarrollar una iteración. Para la bloquización, las plantas sembradas fueron distribuidas en tres bloques de acuerdo a su edad inicial conformados por 5 plantas cada uno, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. *Distribución en bloques de las 15 plantas sembradas.*

Bloque	Edad inicial	Nº de Plantas
A	1 año	1, 2, 3, 4, 5
B	Seis meses	6, 7, 8, 9, 10
C	Dos meses	11, 12, 13, 14, 15

Nota: * Asignación de números a las plantas por bloques, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.

El factor de tratamiento del diseño experimental fue triple 15 como abono y se aplicó aleatoriamente en diferentes cantidades al inicio del trabajo de campo (Tabla 4).

Tabla 4. *Asignación aleatoria del factor de tratamiento por bloques.*

Factor: Abono						
Bloque		Placebo	Tratamiento 1	Tratamiento 2	Tratamiento 3	Tratamiento 4
A	Nº Planta	1	5	3	4	2
B		9	10	7	8	6
C		13	14	11	15	12

Nota: * Distribución del factor de tratamiento en las plantas, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.

Las cantidades de triple 15 aplicadas en los tratamientos del 1 al 4, fueron 30gr, 35gr, 40gr y 45gr, respectivamente. El placebo se realizó para garantizar la efectividad del tratamiento; por ende, a las plantas 1, 9, 13 y 20 no se le agregó ninguna cantidad de abono.

Los registros de crecimiento se realizaron semanalmente durante tres meses, específicamente trece semanas comprendidas entre septiembre, octubre y noviembre; en la primera visita se hizo un conteo general de las iteraciones de cada rama de las plantas y se eligió la rama con más

iteraciones, asumiendo que todas las ramas presentan el mismo comportamiento de acuerdo al principio de los L-sistemas. Para facilitar el conteo de las iteraciones iniciales y diferenciar las nuevas, se amarró un cordón de color en cada iteración de la rama escogida.

Adicional, se registró en cada visita la longitud de la planta como medida de seguimiento y se hizo un registro fotográfico; tanto de la planta en general como de cada iteración nueva.

Tabla 5. *Formato de seguimiento de trabajo de campo.*

Semana	Fecha	Bloque	A					B					C				
		N° de Planta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
		Iteración															
		Altura (cm)															

Nota: * Formato para registros semanales, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.

7.3.2. Actividad 2: Caracterización del suelo.

- **Humedad y pH:**

Con ayuda del equipo medidor de pH y humedad del suelo se midieron in situ dichos parámetros; el equipo está compuesto de dos sondas como se observa en la Figura 3, estas se introdujeron en el suelo de alrededor de las plantas sembradas hasta el nivel de sus raíces y este automáticamente indicaba el valor de pH o humedad de acuerdo a la ubicación del botón en el parámetro que se deseaba conocer. El equipo tiene incluido en el visor de lectura valores de pH y humedad desde 4 a 8 y de 1 a 10, respectivamente; en el caso del pH, 4, 5 y 6 significan acidez, 7 neutralidad y 8 alcalinidad y para la humedad, hay rangos establecidos de 0 a 100% para categorizar el suelo en seco (10-30)%, húmedo (40-70)% y muy húmedo (80-100)%.



Figura 3. *Medidor de pH o humedad del suelo (Mactronica, 2019).*

- **Nitratos:**

- 1. Evaluación de la absorbancia a diferentes longitudes de onda:**

Para medir los nitratos del suelo fue necesario realizar inicialmente una evaluación de la absorbancia a diferentes longitudes de onda en el equipo Spectroquant Prove 600, para posteriormente escoger la longitud de onda con la que se realizará la curva de calibración y se calcularán los nitratos de cada punto. La evaluación se realizó teniendo en cuenta la guía de “Determinación de nitratos en aguas por espectrofotometría UV” del Instituto Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales”; la cual señala que para la preparación de la solución patrón es necesario disolver 0,1805g de nitrato de potasio (KNO₃) en 250ml de agua destilada en un balón aforado (IDEAM, 2007).

A partir de la solución patrón elaborada, se hicieron diluciones para obtener cuatro soluciones de trabajo adicionales con concentraciones (peso/volumen) de 60ppm, 30ppm, 20ppm y 10ppm y fueron aforados en balones de 10ml con agua destilada. Posteriormente se tomaron los 10ml de todas las soluciones de trabajo y se traspasaron a vasos precipitados de 100ml para añadirle a cada una el sachet de nitratos; tras añadir el sachet, se agitaron las soluciones en una plancha de agitación con su respectivo agitador magnético y finalmente, con cada solución se llenó la celda de cuarzo para hacer la lectura espectrofotométrica de la absorbancia en un rango de longitud de onda de 300 a 600nm.

- 2. Cálculo de la concentración de nitratos del suelo:**

Los datos obtenidos en la evaluación anterior se registraron en la Tabla 6 y con estos se procedió a determinar la longitud de onda que se utilizará para calcular la concentración de nitratos del suelo; para esto, fue necesario operar los valores de absorbancia registrados para cada solución de trabajo en el rango de 300 a 600nm. Dicha operación hace referencia a la diferencia entre la absorbancia de las siguientes concentraciones: 100ppm menos 60ppm, 60ppm menos 30ppm, 30ppm menos 20ppm y 20ppm menos 10ppm y finalmente se hizo la sumatoria de esas diferencias para todo el rango de longitudes de onda; el valor máximo obtenido correspondió a la longitud de onda escogida.

Tabla 6. Formato para registrar los datos de absorbancia para las soluciones patrón.

Longitud de onda (nm)	Concentraciones					Diferencias entre la absorbancia				Sumatoria de diferencias
	100 ppm	60 ppm	30 ppm	20 ppm	10 ppm	(100-60) ppm	(60-30) ppm	(30-20) ppm	(20-10) ppm	
	Absorbancia									
300										
...										
600										

Nota: * Lectura de absorbancias en un rango de longitud de onda de 300 a 600nm, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019

Por un lado, con el valor de longitud de onda seleccionado, a cada solución patrón se le realizó nuevamente la lectura de absorbancia y se procedió a realizar la curva de calibración con su ecuación de línea de tendencia. La curva de calibración es una gráfica entre la concentración de las soluciones de trabajo (eje X) y su respectiva absorbancia (eje Y); por tal motivo, de la ecuación de línea de tendencia se despejó X para posteriormente calcular la concentración de nitratos específicamente de las muestras de suelo de alrededor de las plantas.

Por otro lado, para la recolección de las muestras, se tomaron 100g de muestra de suelo alrededor de cada una de las 15 plantas sembradas en el campus Loma Linda equivalentes a 15 muestras numeradas de acuerdo al número de su respectiva planta y se trasladaron al laboratorio de aguas en el campus Aguas Claras de la Universidad Santo Tomás para disponerlas en cápsulas de porcelana y secarlas en el horno a 60°C durante 24 horas.

Transcurrido este tiempo se procedió a triturar cada muestra en un mortero de porcelana, posteriormente se tamizaron en un tamiz de 2mm, se pesaron 40g de cada muestra y se disolvieron en 100ml de agua destilada obteniendo una relación de 2,5 (40g/100ml) en vasos precipitados de 200ml agitándose 30 minutos en la plancha de agitación con su respectivo agitador magnético. Seguidamente, se filtró cada muestra a través de papel filtro dispuesto en un embudo de porcelana, se agregó 10ml de cada una en vasos precipitados de 100ml adicionándole un sachet de nitratos y se agitó hasta disolverlo completamente. Finalmente, a cada muestra recolectada se le realizaron cinco lecturas de absorbancia en el espectrofotómetro a la longitud de onda escogida tras la evaluación de la absorbancia, para obtener un promedio de absorbancia por muestra y con el

despeje de X en la ecuación de la línea de tendencia de la curva de calibración, se calcularon las concentraciones de nitratos para cada muestra de suelo y el valor obtenido se multiplicó por la relación 2,5 de la dilución realizada para obtener el valor de concentración de nitratos.

7.3.3. Actividad 3: Extrapolación de datos teóricos de captura de CO₂ con respecto a la iteración y su tiempo de crecimiento.

El CO₂ capturado por la mandarina “Arrayana” fue estimado a partir de la extrapolación de un valor teórico de captura de CO₂ de un árbol de 15 años de edad de esta especie a cualquier etapa de vida de la planta; teniendo en cuenta que a partir de la relación existente entre cada proceso iterativo y el tiempo de repetición del patrón de crecimiento, se determinó la cantidad de iteraciones realizadas por el árbol a esta edad y reemplazando en el modelo de crecimiento exponencial, se calculó el número de ramas y hojas acumuladas para dicha iteración.

Es importante resaltar que dicho valor teórico de captura de CO₂ es producto de una investigación realizada en España a sus árboles más representativos, entre ellos, el árbol de mandarina; su estudio está enfocado en la captura de CO₂ tanto de la parte subterránea de la planta como de su parte aérea; para la presente investigación solo se tuvo en cuenta la captura de CO₂ de la biomasa aérea correspondiente a la sumatoria de la captura de CO₂ de ramas, hojas, tallos y tronco, durante un año (Mota, Alcaraz, Iglesias, Martínez, & Carvajal, 2011).

7.3.4. Actividad 4: Relación de la captura de CO₂, cantidad de ramas y hojas, iteraciones totales, crecimiento de altura total, concentración de nitratos, humedad y pH de las plantas.

Obtenidos los datos de las distintas variables de la planta (captura de CO₂, cantidad de ramas y hojas, iteraciones totales, crecimiento de altura total, concentración de nitratos, humedad y pH) a través de las fases anteriores, se utilizó el software SPSS Statistics 25 para analizarlos estadísticamente mediante una matriz de correlación; lo cual permitió determinar la relación entre las variables para posteriormente establecer que variables incluir en un modelo de regresión lineal en el que la variable dependiente fue la captura de CO₂ por parte de la planta de mandarina “Arrayana”.

8. Resultados y análisis de resultados

8.1.Fase 1: Construcción del patrón de crecimiento de la planta mediante los L-sistemas

8.1.1. Actividad 1: Determinación de las variables del L-sistema.

A partir de la observación estructurada de la distribución de las ramas y hojas de una planta de mandarina “Arrayana” ubicada en el campus Loma Linda de la Universidad Santo Tomás de Villavicencio, se determinaron las variables del L-sistema correspondientes a esta especie: cantidad de segmentos en que se divide el tallo (N), razón en que se divide (r) y dimensión fractal (D), descritas a continuación en la Tabla 7.

Tabla 7. Variables del L-sistema de una planta de mandarina “Arrayana”.

Variables del L-sistema		
N	r	D
2	$\frac{1}{N} = \frac{1}{2} = 0,5$	$D = \frac{\ln(N)}{\ln(1/r)}$ $D = \frac{\ln(2)}{\ln(1/0,5)}$ $D = 1$

Nota: * Valores determinados de las variables del L-sistema, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020

La variable N será utilizada en la actividad 2 de la presente fase. A pesar de que la dimensión fractal no será utilizada en la formulación del modelo, representa un indicador valioso de la complejidad de la forma de la planta; la dimensión fractal de la planta de mandarina “Arrayana” es 1, este número crece en la medida que la forma sea más irregular; por lo tanto esta especie es considerada un fractal, lo que permite diseñar su patrón de crecimiento basado en las características fractales de los L-sistemas (Veliz & León, 2017).

8.1.2. Actividad 2: Modelamiento del patrón de crecimiento.

El patrón de crecimiento se estableció de acuerdo a las instrucciones de los L-sistemas (Rubiano, 2002). Adicional, se consideró que la variable N (cantidad de segmentos en que se divide

el tallo) es igual a 2, división correspondiente a la iteración 1 que se puede observar en la parte izquierda de la Tabla 8.

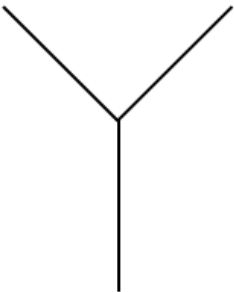
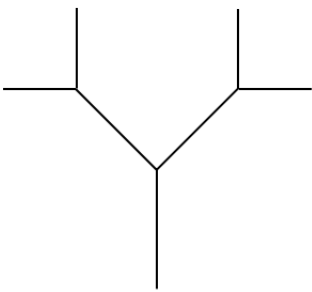
Teniendo en cuenta lo anterior, el patrón de crecimiento de la mandarina “Arrayana” es:

$$F = F + [F] - - [F]$$

Significa: trace una línea F de determinada longitud y al final de ella, gire a la derecha $+$ y trace otra línea que quedará inclinada a la derecha, regrese al punto donde la inició $[F]$, gire a la izquierda en la misma magnitud que había girado a la derecha dos veces $- -$ para realizar la última línea inclinada a la izquierda y regrese a donde la inició; así finaliza el modelamiento del patrón de crecimiento de una planta de mandarina “Arrayana”.

Cada vez que se repite el patrón de crecimiento corresponde a una iteración y este patrón se aplica a cada una de las ramas que se van generando; por ejemplo, al repetir el patrón de crecimiento en las dos ramas generadas en la iteración 1 (parte izquierda de la Tabla 8), se obtiene la iteración 2 (parte derecha de la Tabla 8).

Tabla 8. Iteraciones del patrón de crecimiento de la planta.

	
Iteración 1	Iteración 2

Nota: * Iteración 1 y 2 de la planta de mandarina “Arrayana”, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020

8.2.Fase 2: Cálculo del número de ramas y hojas de la planta

8.2.1. Actividad 1: Solución del modelo de crecimiento exponencial dado por las ecuaciones diferenciales.

Partiendo de la solución general del modelo de crecimiento exponencial (Zill, 2009):

$$X(i) = ce^{k(i)} \text{ (Ecuación 3)}$$

Se establecieron dos condiciones iniciales de acuerdo a la observación del crecimiento del árbol de mandarina:

$$\text{Condición 1: } X(0) = 1$$

$$\text{Condición 2: } X(1) = 2$$

Representan, condición 1: para una iteración 0 se genera una rama principal y la condición 2: para la iteración 1 se generan 2 ramas a partir de la rama principal.

A partir de estas condiciones iniciales es posible determinar la cantidad de ramas y hojas en cualquier iteración hallando las constantes y reemplazando como se demuestra a continuación:

La condición 1 se reemplaza en la Ecuación 3 para encontrar el valor de la constante de integración (c):

$$x(i) = ce^{k(i)}$$

$$1 = ce^{k(0)}$$

$$1 = c$$

Tras hallar el valor de c , se reemplaza en la Ecuación 3 la condición 2 para encontrar el valor de la constante de proporcionalidad (k):

$$x(i) = ce^{k(i)}$$

$$2 = 1e^{k(1)}$$

$$\ln(2) = k$$

$$k = 0,6931471806$$

Con el valor de las constantes se formula el modelo de crecimiento exponencial que permite calcular el número de ramas y hojas de la planta por iteración: $x(i) = e^{0,6931471806(i)}$

Ecuación 5. *Solución particular del modelo de crecimiento exponencial de la planta de mandarina “Arrayana”.*

Demostración de la solución del modelo matemático para la iteración 3:

$$X(3) = ?$$

$$X(3) = e^{0,6931471806(3)}$$

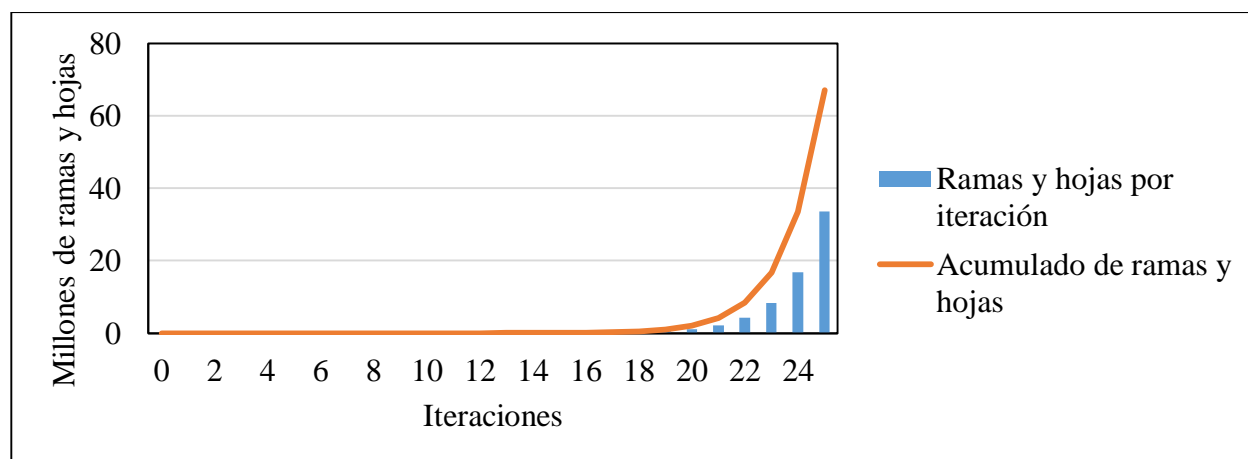
$$X(3) = 8$$

Así mismo, se aplicó el modelo matemático para las iteraciones 1-25 y los resultados de la cantidad de ramas y hojas por iteración se evidencian en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados de la aplicación del modelo para cada iteración.

Iteración	Ramas y hojas por cada iteración	Acumulado de ramas y hojas	Iteración	Ramas y hojas por cada iteración	Acumulado de ramas y hojas
0	1	1	13	8.192	16.383
1	2	3	14	16.384	32.767
2	4	7	15	32.768	65.535
3	8	15	16	65.536	131.071
4	16	31	17	131.072	262.143
5	32	63	18	262.144	524.287
6	64	127	19	524.288	1.048.575
7	128	255	20	1.048.576	2.097.151
8	256	511	21	2.097.152	4.194.303
9	512	1.023	22	4.194.304	8.388.607
10	1.024	2.047	23	8.388.608	16.777.215
11	2.048	4.095	24	16.777.216	33.554.431
12	4096	8191	25	33.554.432	67.108.863

Nota: * Acumulado de ramas y hojas por iteraciones de la planta de mandarina “Arrayana”, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.



Gráfica 1. Relación entre la cantidad de ramas y hojas generadas por iteración y el total de ramas y hojas, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

La Gráfica 1 representa los datos registrados en la Tabla 9 y permite observar que el crecimiento en la cantidad de ramas y hojas es de tipo exponencial, este comportamiento es más notorio en la fase temprana de la planta; por este motivo, este tipo de modelo resulta particularmente apropiado para las plantas del presente estudio, las cuales no superan los 15 meses de edad (Di Benedetto & Tognetti, 2016).

8.3.Fase 3: Estimación de captura de dióxido de carbono (CO₂) de la planta

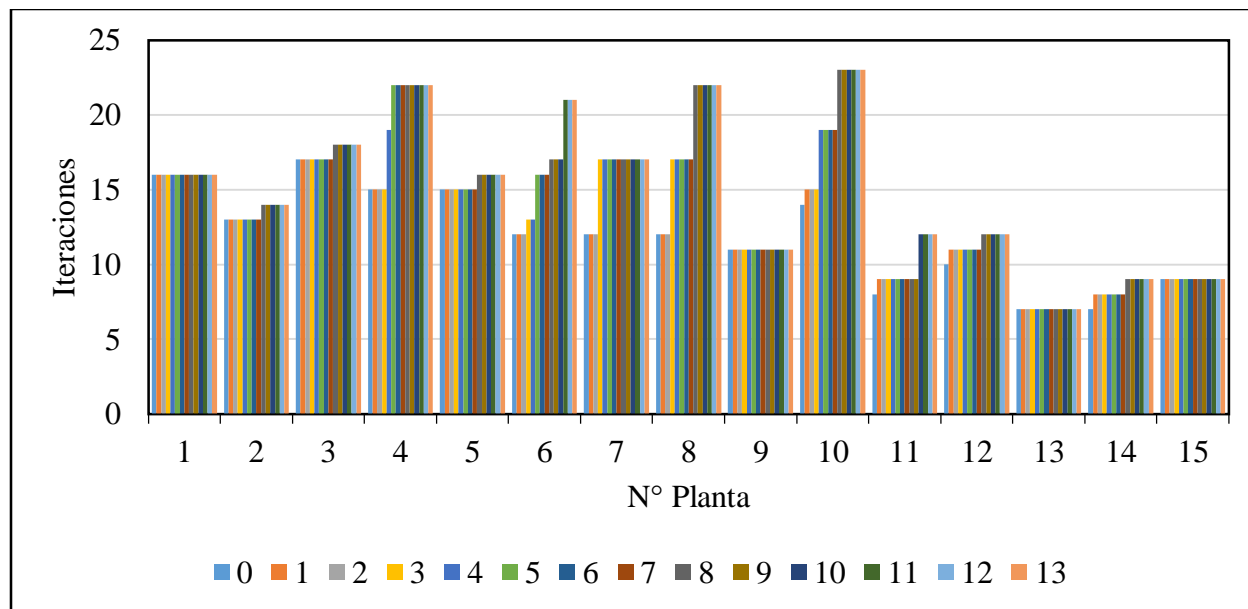
8.3.1. Actividad 1: Asignación de tiempo de crecimiento a cada iteración.

A continuación, se evidencian los resultados del trabajo de campo realizado por medio del diseño experimental descrito anteriormente en la metodología. El detalle de los datos registrados semanalmente del crecimiento de iteraciones y longitud de las plantas en el formato de seguimiento de trabajo de campo (Tabla 5) se encuentran en el Apéndice A, así como los registros fotográficos por planta de las semanas representativas debido a que se eliminaron las fotos de las semanas en las que no hubo generación de iteraciones por parte de ninguna planta (Apéndice B).

La variación en los datos de las unidades experimentales tratadas, en este caso las plantas, se puede describir a través del error experimental que se estima que provenga de distintos orígenes como lo son: la variación natural entre las unidades experimentales, la variabilidad en la toma de datos de acuerdo al investigador, la imposibilidad de reproducir con exactitud las condiciones del tratamiento entre una unidad y otra, la interacción de los tratamientos con las unidades experimentales, la imposibilidad de asegurar las condiciones climáticas adecuadas para el crecimiento de las plantas, entre otros factores externos que influyeron en las variables medidas (Kuehl, 2001).

- **Crecimiento de iteraciones de las plantas durante las trece semanas**

La Gráfica 2 evidencia el crecimiento de las iteraciones de cada una de las plantas durante las trece semanas de observación y toma de datos, los números del 1 al 13 indican dichas semanas; a partir de esta gráfica es posible evidenciar que la planta que al finalizar la semana 13 terminó con más iteraciones (23 iteraciones) fue la planta 10. Así mismo, se observa que las plantas 1, 9, 13 y 15 durante las trece semanas tuvieron la misma cantidad de iteraciones.



Gráfica 2. Registro de iteraciones semanales por planta, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

Sin embargo, analizando el comportamiento por bloques; la planta 10 del bloque B superó en iteraciones a las plantas 1-5 del bloque A, las cuales tenían mayor edad y se esperaba que mantuvieran mayor cantidad de iteraciones. Por el contrario, las plantas 13, 14 y 15 del bloque C mantuvieron el crecimiento de iteraciones por debajo de los demás bloques, solo la 11 y la 12 superaron la planta 9 del bloque B que no creció durante las trece semanas.

La Tabla 10 representa el total de iteraciones realizadas por las quince plantas de mandarina “Arrayana” sembradas (51 iteraciones), así como el promedio de iteraciones realizadas tanto por bloque como en general. El bloque que en promedio realizó mayor cantidad de iteraciones es el bloque B, seguido del bloque A y finalmente el bloque C, con valores de 6,6, 2 y 1,6 iteraciones, respectivamente; para un promedio general de 3,4 iteraciones.

Partiendo de que cada semana tiene siete días, las trece semanas de toma de datos corresponden a 91 días y en promedio, durante este tiempo las plantas realizaron 3,4 iteraciones; es decir que una iteración se realiza cada 26,8 días.

Con la bloquización por edades hecha en el estudio, se puede observar en los promedios por bloques de la Tabla 10 que a pesar de que las plantas se encuentran en la misma fase joven, existen diferencias en el crecimiento; dado que al bloque A pertenecen las plantas de mayor edad se pudo analizar que su número de ramas y hojas se acerca a una asíntota, el bloque B es el de las plantas

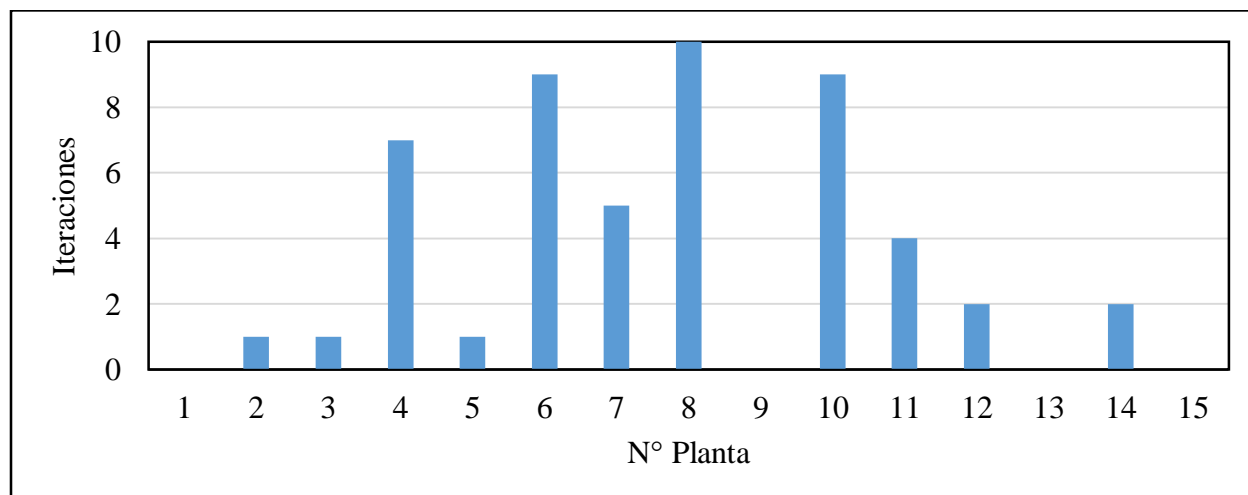
con una edad media y su crecimiento refleja una aceleración exponencial; finalmente, el bloque C de las plantas de menor edad presenta un crecimiento lento (Halloy, 2008).

Tabla 10. Promedio de iteraciones por bloque.

Bloque	A					B					C					Total
N° Planta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Iteraciones totales generadas	0	1	1	7	1	9	5	10	0	9	4	2	0	2	0	51
Promedio de iteraciones	2					6,6					1,6					Promedio
																3,4

Nota: * Iteraciones totales generadas con su respectivo promedio por bloque, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

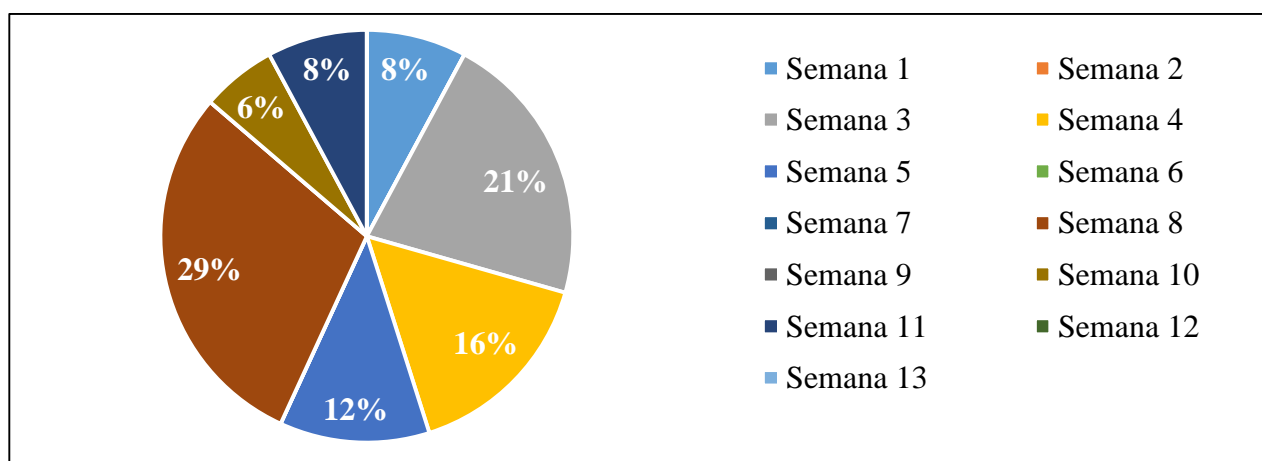
La Gráfica 3 recopila la cantidad de iteraciones realizadas por cada planta durante el tiempo de toma de datos, se observa que la planta que realizó mayor cantidad de iteraciones fue la planta 8. A pesar de que como se dijo anteriormente que la planta 10 al finalizar las trece semanas tenía mayor cantidad de iteraciones; esta no fue la que más realizó en este tiempo debido a que su cantidad de iteraciones iniciales era superior a la planta 8.



Gráfica 3. Iteraciones realizadas por las plantas durante 13 semanas, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

Como ocurrió en la Gráfica 2 que las plantas 1, 9, 13 y 15 se mantuvieron constantes en cuanto a sus iteraciones, en la Gráfica 3 se evidencia que no generaron ninguna iteración durante las trece semanas. Clasificando por bloques, a pesar de que las plantas del bloque B no son las de mayor edad, fueron las que mayor cantidad de iteraciones generaron.

La Gráfica 4 representa porcentualmente cuál fue la semana en la que se generaron mayor cantidad de iteraciones respecto al total de las iteraciones realizadas por todas las plantas y evidencia que la semana en la que las plantas realizaron mayor cantidad de iteraciones fue la semana 8 con un 29%, seguida de la semana 3 con 21%. En las semanas 2, 6, 7, 9, 12 y 13 no se evidenció generación de iteraciones.



Gráfica 4. Relación porcentual de la cantidad de iteraciones por semana respecto al total de iteraciones realizadas por todas las plantas, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

El registro de la semana 8 corresponde al día 22 de octubre y el de la semana 3 al día 17 de septiembre; es pertinente resaltar que, dentro de las fechas abarcadas en el presente estudio (septiembre-noviembre), otro estudio realizado en el piedemonte llanero, evidencia que la semana del 22 de octubre también corresponde a la semana de mayor alargamiento del brote de la mandarina “Arrayana” durante estos meses (Orduz, Monroy, & Fisher, 2010).

Las plantas de mandarina “Arrayana” presentan tres picos de brotación en el transcurso de un año; los cuales están directamente relacionados con el comportamiento monomodal de la precipitación en el piedemonte del Meta, uno de esos picos está comprendido entre septiembre y octubre y podría inferirse que es la razón por la que durante estas semanas se generaron mayor cantidad de iteraciones (Orduz, Monroy, & Fisher, 2010).

- **Relación entre las iteraciones y la cantidad de ramas y hojas generadas**

En la Tabla 11 se pueden observar cada una de las iteraciones generadas por planta al finalizar las 13 semanas, junto a ese valor se encuentra el total de ramas y hojas producidas para dicha iteración teniendo en cuenta la Ecuación 5 y los valores calculados en la Tabla 9.

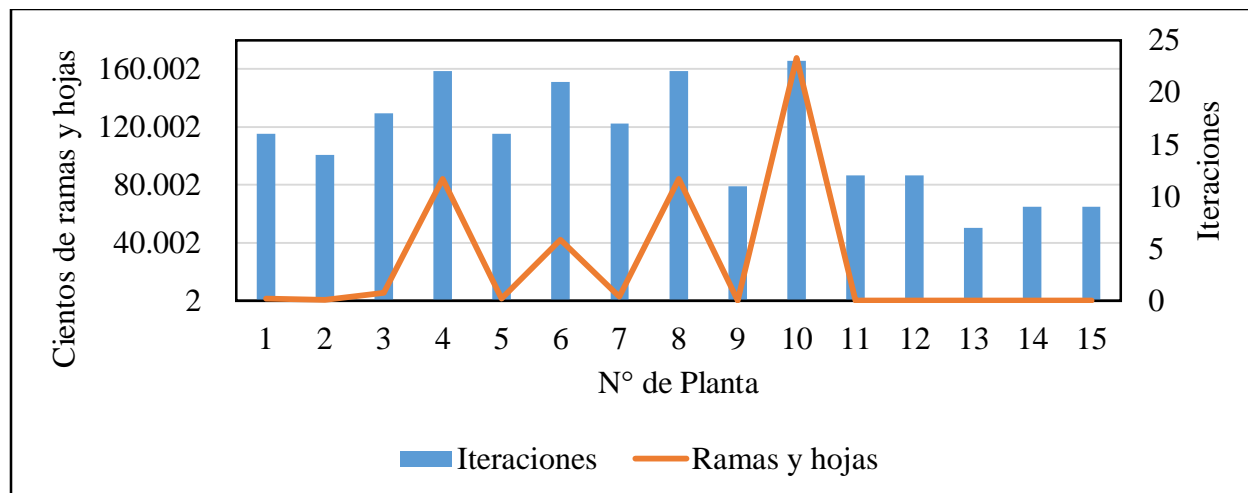
De este modo, se demuestra que efectivamente la planta con mayor cantidad de iteraciones fue la planta que produjo más ramas y hojas; es decir, la planta 10 perteneciente al bloque B, con un total de 23 iteraciones y 16.777.215 ramas y hojas; por otra parte, la planta con menor cantidad de iteraciones y ramas y hojas fue la planta 13 del bloque C, con 7 iteraciones y 255 ramas y hojas.

Tabla 11. *Acumulado de ramas y hojas por planta.*

N° Planta	Iteraciones totales	Acumulado de ramas y hojas	N° Planta	Iteraciones totales	Acumulado de ramas y hojas
1	16	131.071	9	11	4.095
2	14	32.767	10	23	16.777.215
3	18	524.287	11	12	8.191
4	22	8.388.607	12	12	8.191
5	16	131.071	13	7	255
6	21	4.194.303	14	9	1.023
7	17	262.143	15	9	1.023
8	22	8.388.607			

Nota: * Acumulado de ramas y hojas de las quince plantas de mandarina “Arrayana”, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

La Gráfica 5 es la representación de los valores registrados en la Tabla 11, donde en el eje X se encuentran las 15 plantas, en el eje Y principal (parte izquierda de la gráfica) la cantidad de ramas y hojas y en el eje Y secundario (parte derecha de la gráfica) los valores de iteraciones.



Gráfica 5. Relación entre el total de ramas y hojas con las iteraciones, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

- **Relación entre las iteraciones y los factores de tratamiento de las plantas**

El suelo es un factor esencial en la productividad agrícola debido a que en él se generan múltiples estímulos ambientales que afectan la fisiología de las plantas; por eso, al adicionarle fertilizantes ocurren alteraciones en el mismo, que repercuten en las plantas; considerando como fertilizante a toda sustancia que se agrega a la tierra con la finalidad de aumentar la producción alimenticia utilizada por las plantas; en condiciones naturales, los elementos químicos se encuentran en la materia orgánica y sólo pueden ser aprovechados por la planta hasta que la materia se descomponga y los libere en forma inorgánica, lo que tarda más tiempo que agregar los elementos químicos mediante fertilizantes tanto orgánicos como químicos (Gómez, 2013).

Los fertilizantes orgánicos proporcionan gran parte de los elementos fundamentales para las plantas pero su disponibilidad es limitada y su calidad es variable, lo que ocasiona que la fertilización química sea más utilizada en los cultivos, debido a que esta tiene una alta solubilidad y precipitación; además tiene una rápida mineralización y adsorción al suelo favoreciendo a la disponibilidad de elementos para la planta y a su rápido crecimiento y rendimiento; por lo anterior, se eligió el fertilizante granulado triple 15 como factor de tratamiento, porque es una de las combinaciones comerciales de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) al 15% más utilizadas para tratar los suelos, ya que la alta solubilidad de sus gránulos permite que los nutrientes estén disponibles rápidamente favoreciendo el crecimiento progresivo del área foliar, el incremento de la biomasa por unidad de tiempo (Bautista, Chavarro, Cáceres, & Buitrago, 2017) y la asimilación

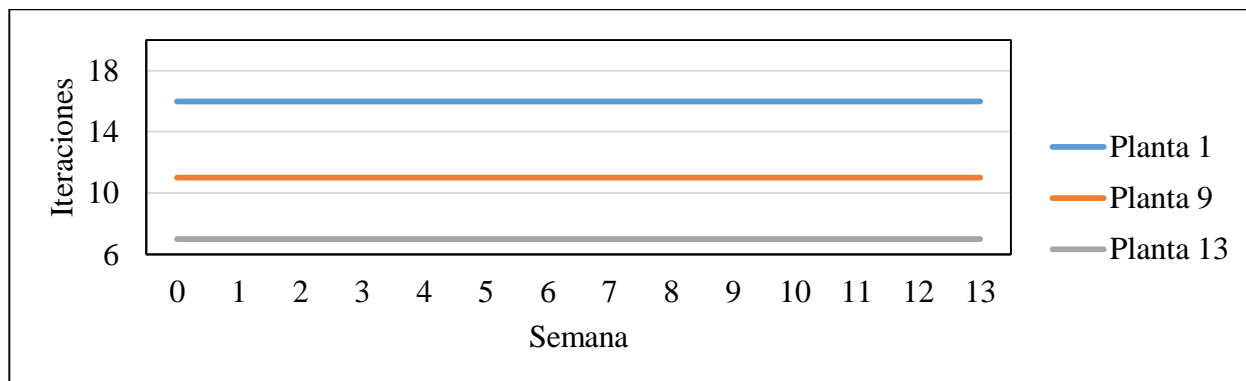
rápida del potasio, el cual facilita la entrada de agua a las células impidiendo la muerte de las hojas por sequía (Banziger, Edmeades, & Bolaños, 1997).

Es importante resaltar que las necesidades de nutrientes de las plantas varían según su edad, dado que la concentración de un nutriente requerida por una planta no es un valor fijo, sino que cambia con el tiempo y fluctúan con el de desarrollo y crecimiento de frutos; la diferencia entre la velocidad de absorción de un nutriente y la del crecimiento de la planta puede generar dilución o acumulación del nutriente dentro de la planta; además, el movimiento de nutrientes dentro y entre las partes de la planta ejerce influencia en la concentración del nutriente que tiene un tejido en un momento específico, es decir que a medida que la planta crece, ocurren marcados cambios en las concentraciones de nutrientes en las partes de la planta (Barbazán, 1998).

Por lo anterior, se tuvo en cuenta la distribución aleatoria por bloques del factor de tratamiento establecida en la metodología (Tabla 4) y se agruparon todas las plantas que fueron tratadas del mismo modo para observar el comportamiento entre ellas durante las 13 semanas, con el fin de encontrar como la misma cantidad de abono influye de manera diferente en cada bloque, debido a los diferentes requerimientos de nutrientes que tiene la planta en el tiempo; a continuación se presentan gráficamente los 5 grupos de plantas con el mismo tratamiento, mostrando la variación entre la cantidad de iteraciones durante el tiempo de estudio.

1. Placebo:

La Gráfica 6 revela que las tres plantas de los tres bloques que fueron catalogadas como placebo mantuvieron el mismo número de iteraciones durante las 13 semanas, de modo que, la planta 1 del bloque A al inicio del estudio (semana 0) registró 16 iteraciones y culminó (semana 13) con las mismas 16 iteraciones, de igual manera ocurrió con la planta 9 del bloque B y la planta 13 del bloque C, las cuales registraron 11 y 7 iteraciones, respectivamente. Es importante resaltar que los bloques a los que pertenece cada planta representan una edad diferente, de modo que la planta 1 perteneciente al bloque A es la de mayor edad; por ende, la que más iteraciones ha generado, es por esto que se encuentra en la parte superior de la gráfica.

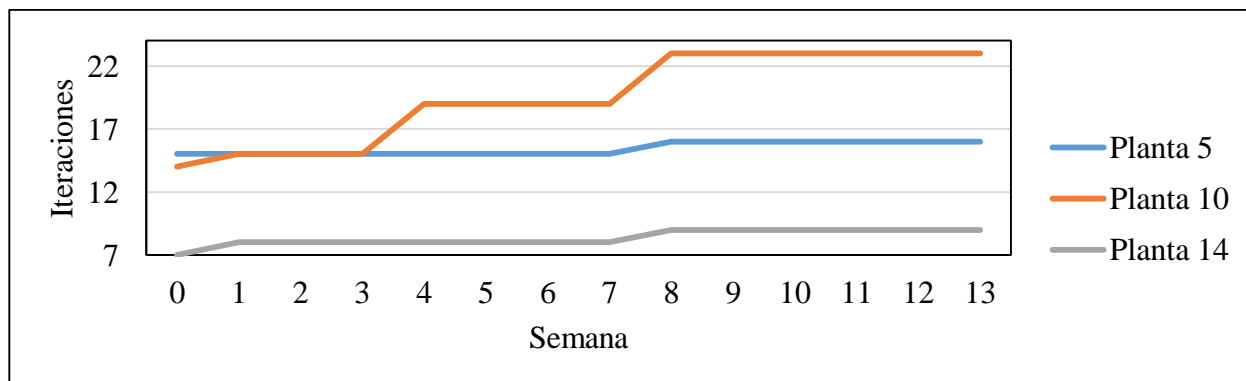


Gráfica 6. Registro semanal de las iteraciones en las plantas placebo, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

2. Tratamiento 1: 30 gr de triple 15

La Gráfica 7 presenta el comportamiento semanal de las iteraciones para las plantas 5, 10 y 14 a las cuales se les agregó la cantidad más baja del factor abono; la planta 5 del bloque A inició (semana 0) en 15 iteraciones y culminó (semana 13) en 16 iteraciones, aumentando su número de iteraciones; lo mismo ocurrió con las plantas 10 y 14, que iniciaron en 14 y 7 iteraciones y terminaron con 23 y 9 iteraciones, respectivamente; en la semana 0 hubo un comportamiento esperado, ya que la edad estaba totalmente relacionada con el número de iteraciones, es decir, la planta con mayor edad presentaba mayor cantidad de iteraciones.

A pesar de que todas aumentaron su número de iteraciones, no aumentaron en la misma proporción, lo que generó que al finalizar el estudio la planta 10 del bloque B superara a la planta 5 del bloque A, sin importar que esta es más joven; se puede estimar que este tratamiento genera mayor efecto a la edad de esta planta.

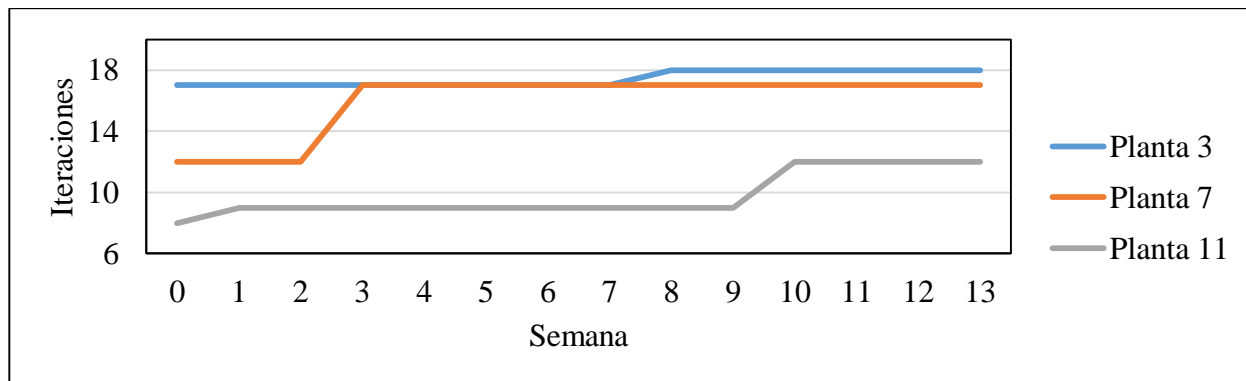


Gráfica 7. Registro semanal de las iteraciones en plantas con tratamiento 1, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

Es importante resaltar que de la semana 7 a la 8 se observa gráficamente un mismo comportamiento en las tres plantas, aunque todas tienen un número diferente de iteraciones, entre estas dos semanas se genera un aumento en el crecimiento de las iteraciones.

3. Tratamiento 2: 35 gr de triple 15

La Gráfica 8 representa el comportamiento del crecimiento de iteraciones semanalmente de las plantas 3, 7 y 11.



Gráfica 8. Registro semanal de las iteraciones en plantas con tratamiento 2, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

A las plantas 3, 7 y 11 se les agregó 35 gr del factor abono; la planta 3 del bloque A inició (semana 0) en 17 iteraciones y culminó (semana 13) en 18 iteraciones, aumentando su número de iteraciones; lo mismo ocurrió con las plantas 7 y 11, que iniciaron en 12 y 8 iteraciones y terminaron con 17 y 12 iteraciones, respectivamente; de la semana 0 a la 2 y entre la semanas 8 y 13 hubo un comportamiento esperado, ya que la edad estaba totalmente relacionada con el número de iteraciones, es decir, la planta con mayor edad presentó mayor cantidad de iteraciones, sin embargo, de la semana 3 a la 7, la planta 7 del bloque B presentó el mismo número de iteraciones de la planta 3 del bloque A.

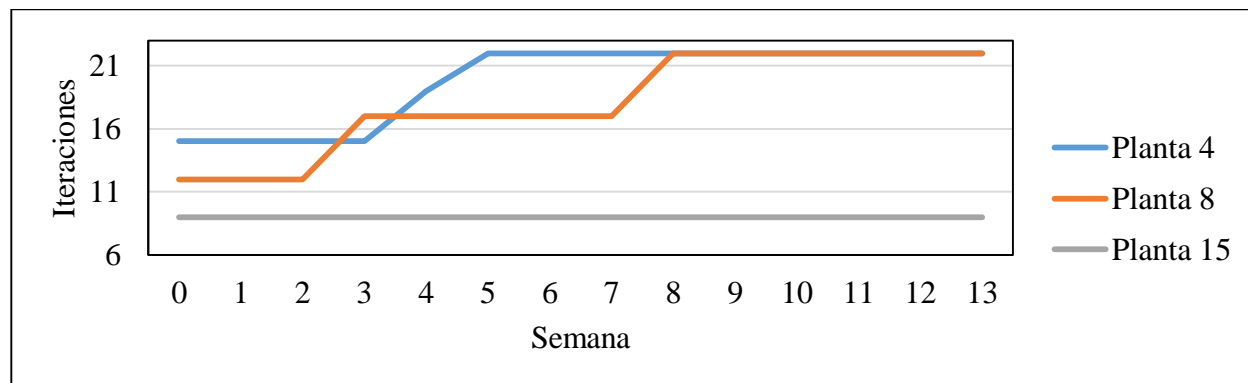
4. Tratamiento 3: 40 gr de triple 15

La Gráfica 9 demuestra el comportamiento por semana de las iteraciones en las plantas 4, 8 y 15 a las cuales se les agregó 40 gr del factor abono; la planta 4 del bloque A y la planta 8 del bloque B iniciaron (semana 0) en 15 y 12 iteraciones, respectivamente, y culminaron con el mismo número de iteraciones (22) desde la semana 8 a la 13 a pesar de la diferencia de edades; aunque las dos aumentaron su número de iteraciones lo hicieron en proporciones diferentes, ya que la planta en la

que hizo mayor efecto el tratamiento fue la 8 del bloque B, dado que creció 10 iteraciones durante el tiempo de estudio.

Por otra parte, la planta 15, mantuvo constante su número de iteraciones durante las 13 semanas, se puede inferir que esta cantidad de triple 15 no genera ningún efecto en las plantas de la edad perteneciente al bloque C.

De la semana 0 - 2 y de la 4 - 7 hubo un comportamiento esperado, ya que la planta con mayor edad presentó mayor cantidad de iteraciones, sin embargo, en la semana 3 la planta 8 superó a la planta 4, independiente de la diferencia de edades.

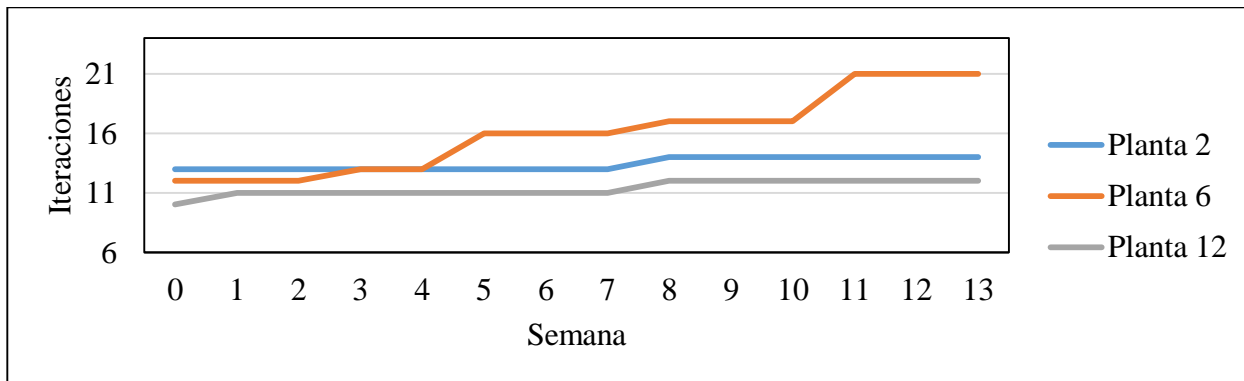


Gráfica 9. Registro semanal de las iteraciones en plantas con tratamiento 3, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

5. Tratamiento 4: 45 gr de triple 15

La Gráfica 10 presenta el comportamiento por semana de las iteraciones en las plantas 2, 6 y 12 a las cuales se les agregó la cantidad más alta del factor abono; todas las plantas presentaron un aumento en sus iteraciones entre las semanas 0 – 13.

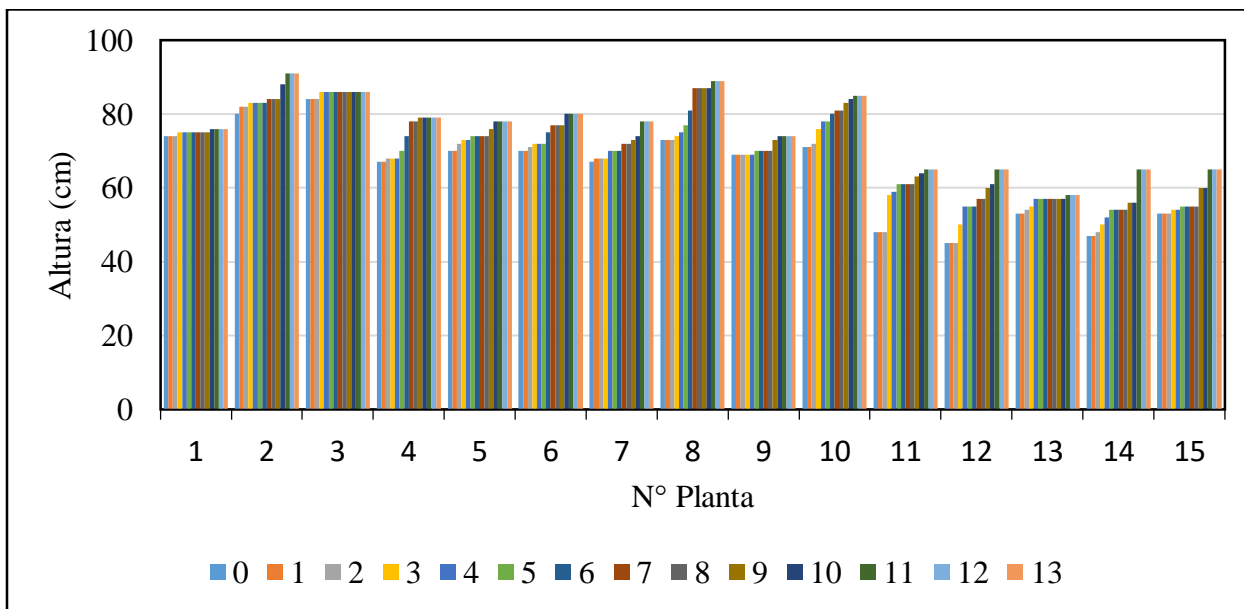
A pesar de que todas aumentaron su número de iteraciones, no aumentaron en la misma proporción, dado que la planta 6 aumentó 9 iteraciones en comparación a las plantas 2 y 12 que aumentaron 1 y 2 iteraciones, respectivamente; lo que generó que al finalizar el estudio la planta 6 del bloque B superara a la planta 2 del bloque A, sin importar que esta es más joven, lo que refleja que el tratamiento genera mayor efecto a la edad de esta planta. Es importante resaltar que las plantas tuvieron un comportamiento similar al de la Gráfica 7 ya que todas crecieron 1 iteración entre la semana 7 a la 8, al igual que la planta del bloque B supera en iteraciones a la planta del bloque A.



Gráfica 10. Registro semanal de iteraciones en plantas con tratamiento 4, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

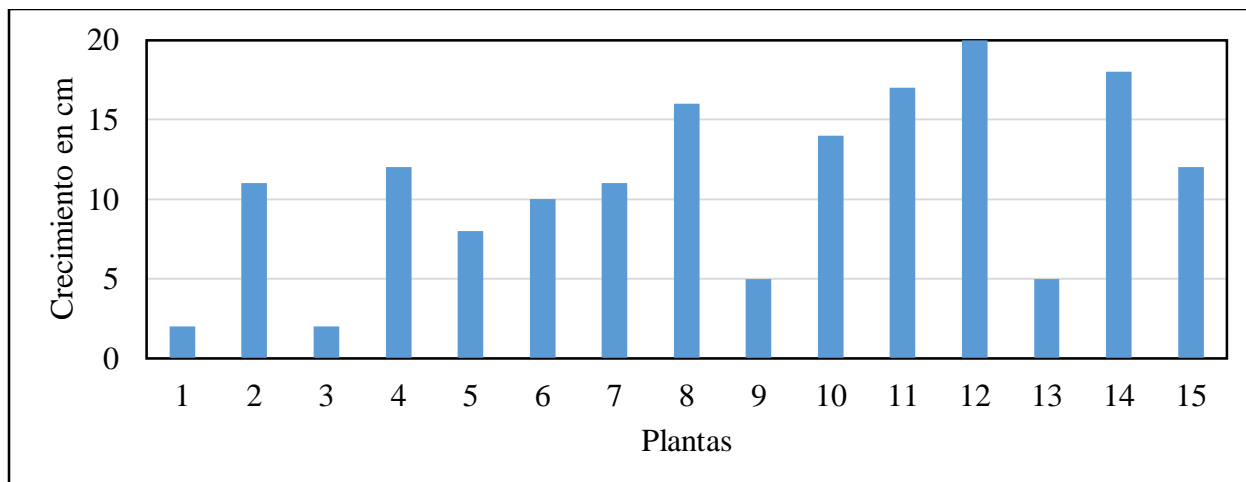
- **Crecimiento en centímetros (cm) de las plantas durante las trece semanas**

La Gráfica 11 representa el crecimiento en centímetros de cada una de las plantas durante las trece semanas representadas con los números del 0 al 13 de la leyenda de la gráfica.



Gráfica 11. Registro de alturas semanales por planta, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

A partir de la Gráfica 11 se puede determinar que en cuanto a altura todas las plantas crecieron. Del total de las plantas, la planta que alcanzó mayor altura fue la planta 2 (91cm) mientras que la más baja fue la planta 13 con 58cm.

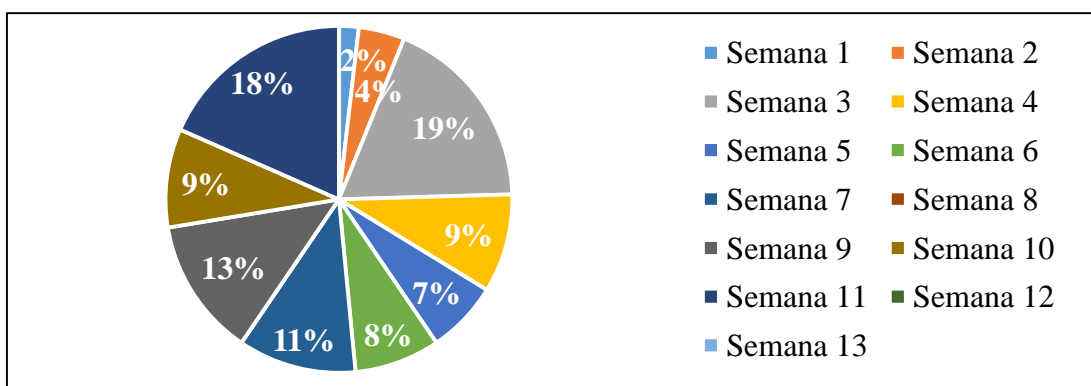


Gráfica 12. Crecimiento en cm de las plantas durante 13 semanas, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

Con la Gráfica 12 es posible evidenciar que respecto al total de las plantas, la planta que más centímetros creció fue la planta 12 (20cm) perteneciente al bloque C; para el bloque B la planta que más creció fue la planta 8 con 16 cm y para el bloque A, la que más creció fue la planta 4 (12cm). Es importante resaltar que la planta que más centímetros creció fue la 12 pero no es la que terminó con mayor altura, esta fue la planta 2 (Gráfica 11).

De acuerdo a la bloquización, el bloque A (plantas de mayor edad) fue superado en crecimiento por algunas plantas del bloque B y C a pesar de ser de menor edad.

La Gráfica 13 evidencia en porcentaje la semana en la que las plantas crecieron más; siendo la semana 3 con 19% seguida de la semana 11 con un 18%. Durante las semanas 8, 12 y 13, no hubo crecimiento en altura de las plantas.



Gráfica 13. Relación porcentual de la cantidad de cm crecidos por semana respecto al total de cm crecidos por todas las plantas, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

Los datos registrados en la semana 3 y 11 se tomaron los días 17 de septiembre y 12 de noviembre, respectivamente. La Gráfica 13 a diferencia de la Gráfica 4 que contiene la relación porcentual de la generación de iteraciones por semana respecto al total de iteraciones realizadas por las plantas; evidencia que el desarrollo de iteraciones no está directamente relacionado con el alargamiento de la planta (cm) debido a que las semanas de mayor porcentaje no coinciden entre las gráficas.

La semana 3 y 11, significativas en la Gráfica 13, corresponden a semanas con buena expansión de hojas y madurez de hojas, respectivamente; esto podría explicar porque el hecho de que las hojas se desarrollen y crezcan su tamaño se relacione directamente con un aumento de la altura de la planta (Orduz, Monroy, & Fisher, 2010).

8.3.2. Actividad 2: Caracterización del suelo

1. Humedad y pH:

En la Tabla 12 se encuentran registrados los datos recolectados de humedad y pH del suelo alrededor de las 15 plantas de mandarina “Arrayana” sembradas.

Tabla 12. Datos recolectados de humedad y pH de las muestras de suelo.

Bloque A			Bloque B			Bloque C		
N° Planta	Humedad (%)	pH	N° Planta	Humedad (%)	pH	N° Planta	Humedad (%)	pH
1	20	6	6	10	6	11	20	6
2	20	6	7	10	6	12	30	6
3	10	6	8	10	6	13	10	6
4	10	6	9	10	6	14	10	6
5	10	6	10	20	6	15	20	6

Nota: * Humedad y pH de las muestras de suelo de cada una de las quince plantas, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

Los cítricos, incluida la mandarina “Arrayana” son cultivados en una amplia variedad de suelos, desde texturas arcillosas a arenosas, como en suelos con pH ácidos o alcalinos; sin embargo, el

rango de pH óptimo para su cultivo es de 5 a 6 debido a que suelos con pH más bajos pueden presentar problemas de deficiencia de calcio y magnesio y suelos con pH superiores a 6 tienen inconvenientes con la fijación de hierro y zinc (Orduz, 2005).

El pH del suelo es una de las variables más importantes del suelo, tiene una relación directa con la absorción de los nutrientes, el desarrollo de las raíces y el crecimiento de las plantas; mantener un pH óptimo dentro del rango permite obtener los mejores rendimientos y la mayor productividad, debido a que los nutrientes son más asimilables y tendrán mayor aporte al cultivo (Catalán, 2016).

Como se observa en la Tabla 12, el valor de pH del suelo alrededor de cada planta sembrada fue de 6; de acuerdo al equipo utilizado y a la escala de pH, este valor indica que el suelo es medianamente ácido (González J. , 2014). Así mismo se encuentra dentro del rango óptimo de pH para cultivos de mandarina “Arrayana”.

Adicional, se considera que las mejores características de los suelos para cítricos son aquellos de textura media a arenosa (arenoso-franco a franco-arenoso), con pendientes no muy pronunciadas y valores de pH no muy bajos ni muy altos (González & Tullo, 2019), como el valor de pH de 6 del suelo de las plantas del presente estudio.

En cuanto al parámetro de humedad del suelo; en la Tabla 12 se evidencia que las plantas 3-9, 13 y 14 presentan un porcentaje de humedad del 10%, las plantas 1, 2, 10, 11 y 15, 20% y la única planta con humedad del suelo del 30% fue la planta 12.

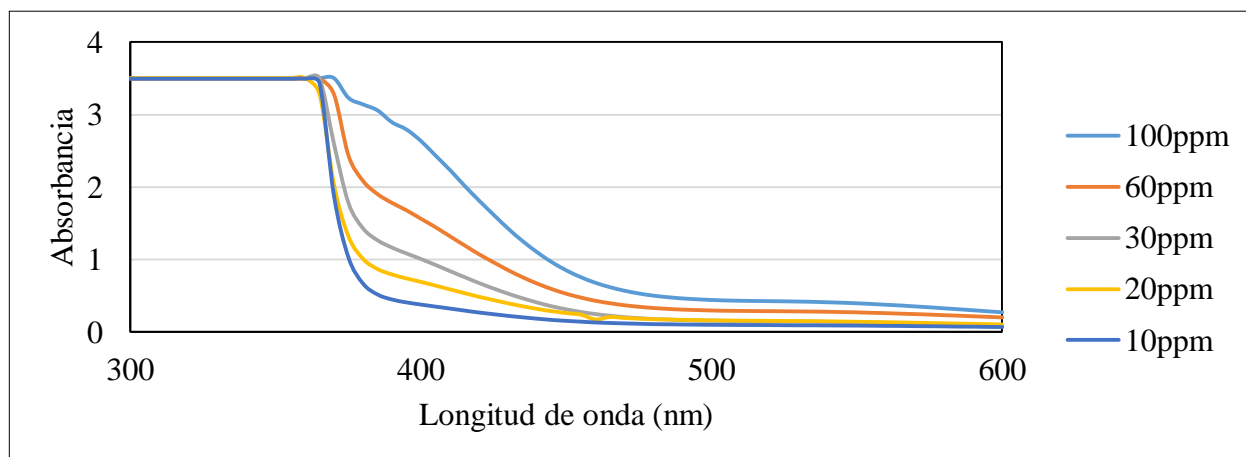
Una buena humedad del suelo favorece el desarrollo de todas las funciones de la planta y se refleja en mayor ganancia de biomasa, mientras que la deficiencia de agua puede alterar los procesos fisiológicos y disminuir el rendimiento (May, Pérez, Ruiz, Caamal, & García, 2011). Lo cual permite inferir que la planta 12, con mayor porcentaje de humedad es la que estaría realizando de forma efectiva todas sus funciones si esto dependiera exclusivamente de la cantidad de agua presente.

La textura del suelo es el factor más influyente en la capacidad del suelo para retener agua disponible para las plantas; los suelos arcillosos generalmente retienen mayor cantidad de agua que los suelos arenosos (Muñoz, 2009). Los suelos dominantes de los Llanos Orientales, se encuentran dentro del orden de los oxisoles (González J. , 2014); los cuales, tienen textura arcillosa (Ibáñez, Gisbert, & Moreno, 2012). Se esperaría que el lugar donde se desarrolló la presente investigación evidencie estas características; sin embargo, ningún dato de humedad del suelo de las plantas registró valores superiores al 50%.

2. Nitratos:

2.1. Evaluación de la absorbancia a diferentes longitudes de onda:

El detalle de la evaluación inicial de la absorbancia en el rango de longitud de onda de 300nm a 600nm necesaria para posteriormente calcular la concentración de nitratos del suelo se encuentra en el Apéndice C. Así mismo, la Gráfica 14 resume dichos datos registrados en el Apéndice C.



Gráfica 14. Evaluación de la absorbancia a diferentes longitudes de onda, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

En la Gráfica 14 se evidencia que a mayor concentración de la solución, mayor es el valor de absorbancia; todas las soluciones a una longitud de onda de 300nm a 360nm no manifiestan variaciones en la absorbancia y es en 365nm donde se generan cambios significativos que indican que de ese valor en adelante se podrá definir el espectro de onda en el que los nitratos reflejan mayor absorbancia.

2.2. Cálculo de la concentración de nitratos:

A partir de los datos registrados de la evaluación inicial evidenciados en la Gráfica 14, se definió 385nm como la longitud de onda con la que se calculará la cantidad de nitratos como se explicó anteriormente en la metodología; para mayor detalle de las operaciones realizadas, el Apéndice C evidencia dichos cálculos.

Esta longitud de onda en comparación con la utilizada por Almeida en el 2016 presenta cercanía, ya que para este estudio se utilizó 415nm; la diferencia podría ser explicada por el tipo de espectrofotómetro y por las concentraciones de las soluciones de trabajo utilizadas; en dicho

estudio las concentraciones fueron inferiores a 3 ppm, mientras que las de la presente investigación son superiores a 10 ppm (Almeida, 2016).

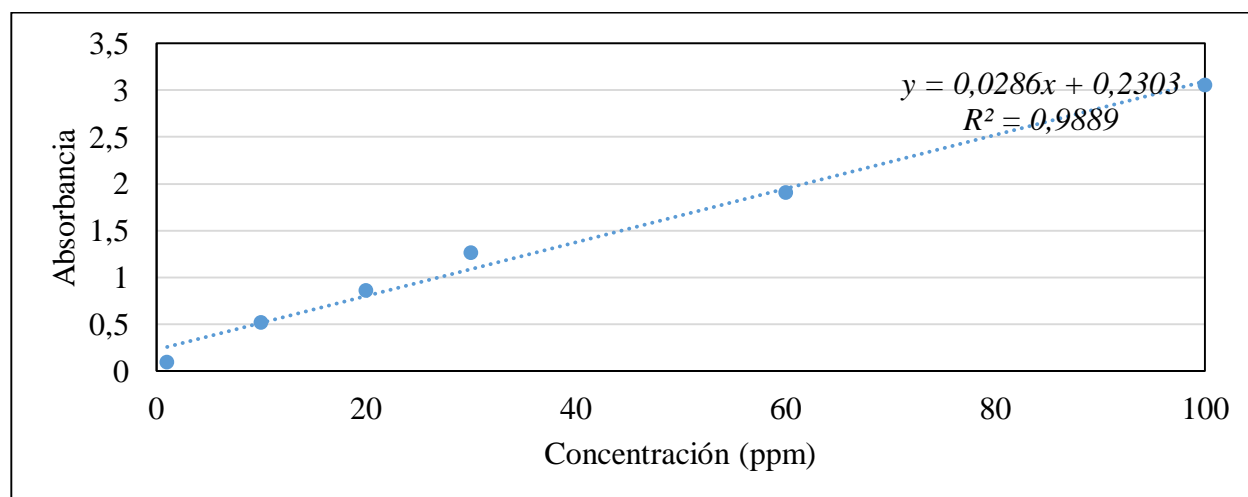
Con la longitud de onda establecida, se realizó nuevamente la lectura de absorbancia en el espectrofotómetro a las soluciones de trabajo registrándose dichos valores en la Tabla 13.

Tabla 13. Absorbancias registradas para cada solución de trabajo.

Concentración de soluciones de trabajo (ppm) (X)	100	60	30	20	10
Absorbancia (Y)	3,056	1,906	1,265	0,866	0,518

Nota: * Absorbancias de las soluciones de trabajo registradas a 385nm, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

La Gráfica 15 correspondiente a la curva de calibración de nitratos, representa los valores de absorbancia registrados para cada una de las soluciones de trabajo en la Tabla 13.



Gráfica 15. Curva de calibración de nitratos, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

A la Gráfica 15 se le generó la línea de tendencia de acuerdo a los valores de absorbancia graficados y su respectiva ecuación: $Y = 0,0286X + 0,2303$

Ecuación 6. Ecuación de la línea de tendencia.

Así mismo, la curva presentó un coeficiente de correlación (R^2) de 0,9889, indicando que existe una alta linealidad entre cada valor de absorbancia generado para las concentraciones de las soluciones de trabajo; de modo que existe una relación directa entre la concentración y la señal del instrumento (Almeida, 2016).

A partir de la Ecuación 6, fue posible despejar la variable X que finalmente permitirá calcular las concentraciones de nitratos de las muestras, de la siguiente forma:

$$X = \frac{Y - 0,2302}{0,0286}$$

Ecuación 7. Ecuación para calcular la concentración de nitratos.

Por otro lado, las evidencias de la recolección de las muestras de suelo de cada punto donde se encuentran sembradas las plantas y su posterior procesamiento en el laboratorio se encuentran en el Apéndice D. Con el procesamiento de las muestras, fue posible hacer la lectura de la absorbancia de cada una a 385nm cinco veces. Los valores de absorbancia registrados para cada muestra y su respectivo promedio se evidencian en el Apéndice E.

Finalmente, para calcular la concentración de nitratos de cada muestra se aplicó la Ecuación 7 y se multiplicó por la relación 2,5 de dilución, obteniendo los valores registrados en la Tabla 14.

Demostración de aplicación de la Ecuación 7 para la planta 1:

$$X = \frac{Y - 0,2302}{0,0286} = \frac{0,445 - 0,2302}{0,0286} = 7,5ppm \left(\frac{peso}{peso}\right) \times 2,5 = 18,7ppm$$

Tabla 14. Concentraciones de nitratos calculadas para cada muestra.

N° de Muestra	Promedio de absorbancia (Y)	Concentración de nitratos (ppm) (X)	N° de Muestra	Promedio de absorbancia (Y)	Concentración de nitratos (ppm) (X)
1	0,445	18,7	9	0,473	21,2
2	0,179	-4,5	10	0,413	16
3	0,315	7,2	11	0,313	7,2
4	0,302	6,2	12	1,428	104,5
5	0,392	14	13	0,397	14,5
6	0,434	17,7	14	0,356	11
7	0,268	3,2	15	0,304	6,5
8	0,240	0,7			

Nota: * Concentración de nitratos por espectrofotometría UV-Vis, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

De las concentraciones registradas en la Tabla 14, se puede destacar que la muestra del suelo de la planta 12 es la que registra mayor contenido de nitratos, con un valor de 104,5ppm que quintuplica al siguiente valor más alto (21,2ppm) perteneciente a la muestra del suelo de la planta 9; por otra parte, el valor de la muestra 2 es negativo, debido a que su concentración de nitratos es inferior a 0,1ppm, valor mínimo de detección de la curva de calibración.

Estas notorias variaciones entre muestras pueden deberse a que la principal fuente de nitrógeno en los ecosistemas son las entradas atmosféricas y a que su subciclo geoquímico es muy limitado; de igual forma, este elemento está prácticamente ausente dentro de los minerales pertenecientes a las rocas madre, de modo que su presencia en los suelos no está disponible permanentemente (Gallardo, Covelo, Morillas, & Delgado, 2009).

El mayor valor de concentración de nitratos (104,5ppm), en comparación con el resultado de Garzón en el 2017 equivalente a 147,3ppm de concentración de nitratos presenta cierta cercanía debido a que ambos estudios se llevaron a cabo en suelos del piedemonte llanero; por lo cual, se infiere que tengan características similares (Garzón, 2017).

Es importante resaltar que el nitrógeno y el fósforo son los dos nutrientes que frecuentemente favorecen y limitan el crecimiento de las plantas (Gallardo, Covelo, Morillas, & Delgado, 2009); lo que permite inferir que en la planta 12, la cual pertenece a la muestra con mayor concentración de nitratos, se podría esperar mayor efecto del favorecimiento del crecimiento debido a la presencia de los nitratos en ella; por el contrario, en la planta 2 sería más notoria la limitación del crecimiento de la planta, producto de sus mínimas concentraciones de nitratos en la muestra.

8.3.3. Actividad 3: Extrapolación de datos teóricos de captura de CO₂ con respecto a la iteración y su tiempo de crecimiento.

El CO₂ capturado por la planta de mandarina “Arrayana” se estimó a partir de la extrapolación del valor teórico de captura de CO₂ de una planta de mandarina de 15 años de edad; dicho valor corresponde a la sumatoria de captura de CO₂ de ramas (1042,8gr), hojas y tallos (3330,8gr) y tronco (432gr) para un total de captura de CO₂ de 4.805,6gr por árbol anual (Mota, Alcaraz, Iglesias, Martínez, & Carvajal, 2011).

Teniendo en cuenta que este valor corresponde al último año de edad de la planta; es decir, la captura de CO₂ entre sus 14 y 15 años, equivalente a 365 días, y bajo el supuesto de que una

iteración se realiza cada 26,8 días; se calculó la cantidad de iteraciones generadas por la planta tanto a los 14 años (190) como a los 15 años (204) y la diferencia entre estos valores es la cantidad de iteraciones que la planta realizó durante ese año (13 iteraciones).

Adicional, para conocer la cantidad de ramas y hojas de la planta durante este año, fue necesario ubicar la iteración 190 y 204 correspondientes a 14 y 15 años, respectivamente, en el Apéndice F que contiene la aplicación a diferentes iteraciones de la Ecuación 5 que es la solución particular del modelo de crecimiento exponencial de la planta de mandarina “Arrayana”. Los valores de ramas y hojas acumulados para una planta de 14 años y 15 años son 3,1386E+57 y 5,1422E+61, respectivamente. La diferencia entre estos datos es de 5,14189E+61 equivalente a la cantidad de ramas y hojas generadas por la planta en las 13 iteraciones que realizó entre sus 14 y 15 años.

- Extrapolación del valor teórico de captura de CO₂ para las quince plantas de mandarina “Arrayana” del presente estudio

La Tabla 15 evidencia la extrapolación del valor teórico de captura de CO₂ a las plantas estudiadas en la presente investigación.

Tabla 15. Captura de CO₂ de las plantas 1-15.

Nº Planta	Iteraciones	Ramas y hojas acumuladas	Captura de CO ₂ acumulada (E-56)(gr)	Nº Planta	Iteraciones	Ramas y hojas acumuladas	Captura de CO ₂ acumulada (E-56) (gr)
1	16	131071	1220	9	11	4095	38,27
2	14	32767	306,24	10	23	16777215	156800
3	18	524287	4899,98	11	12	8191	76,55
4	22	8388607	78399,80	12	12	8191	76,55
5	16	131071	1224,99	13	7	255	2,38
6	21	4194303	39199,90	14	9	1023	9,56
7	17	262143	2449,98	15	9	1023	9,56
8	22	8388607	78399,80				

Nota: *CO₂ capturado de acuerdo al número de iteraciones y a su cantidad de ramas y hojas acumuladas, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020

Se puede resaltar que la planta 10 es la que mayor captura de CO₂ ha realizado con 156.800E-56gr de CO₂ y, por el contrario; la que menor captura de CO₂ realizó fue la planta 13 con 2,38E-56gr de CO₂; estos valores están relacionados directamente con la cantidad de ramas y hojas de la planta; por lo tanto, debido a la fase temprana en la que se encuentran todas las plantas, su captura de CO₂ no es significativa en comparación a la de un árbol adulto.

- Extrapolación del valor teórico de captura de CO₂ para diferentes años de la mandarina “Arrayana”

Tras obtener el valor de la cantidad de ramas y hojas y con el dato teórico de captura de CO₂ de dicha planta, fue posible extrapolarlo para conocer la captura de CO₂ para diferentes años de vida de una planta de mandarina “Arrayana” (Tabla 16).

Tabla 16. Captura de CO₂ para diferentes años de la mandarina "Arrayana".

Edad (años)	Días	Iteraciones	Ramas y hojas acumuladas	Captura de CO ₂ acumulada (gr)
1	365	14	32.767	3,06E-54
5	1825	68	5,903E+20	5,52E-38
10	3650	136	1,742E+41	1,63E-17
15	5475	204	5,142E+61	4805,9
20	7300	272	1,518E+82	1,42E+24
25	9125	340	4,479E+102	4,19E+44

Nota: * CO₂ capturado teniendo en cuenta la cantidad de ramas y hojas acumuladas, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

A medida que un árbol crece, incrementa su follaje, ramas, flores y frutos, así como la altura y grosor del tronco; lo cual se manifiesta en una mayor captura de CO₂ (Ramírez & Cardozo, 2016); como se evidencia en la Tabla 16, que a medida que pasan los años, aumenta tanto su cantidad de ramas y hojas, como la captura de CO₂.

En cuanto a la variedad de especies de árboles y sus diferentes componentes, estos tienen distintos volúmenes, densidades y tasas de captura de carbono (Ramírez & Cardozo, 2016). A continuación, se presentan en la Tabla 17, los valores de captura de CO₂ de la mandarina “Arrayana” y de la palma de aceite.

La palma de aceite es de gran importancia en Colombia ya que a nivel mundial el país es el quinto productor de esta especie, con un total de 476.781 ha sembradas hasta el año 2013 y se espera que para el presente año esta cifra aumente a un millón de ha, gran parte de la zona palmera se encuentra en el Meta, en municipios de Cumaral, Restrepo, Acacias, y Castilla la nueva (Pardo, Reuben, Edwards, Rojas, & Laurance, 2017); teniendo en cuenta esto, se eligió esta planta para comparar su valor de captura de CO₂ con el de la mandarina “Arrayana”.

El valor de captura de CO₂ encontrado de la palma de aceite corresponde a una planta de 12 años y se da en forma anual; como en la mayoría de las especies vegetales; por tal motivo, para comparar los valores de captura de CO₂ entre estas dos plantas, fue necesario determinar la captura de CO₂ de la mandarina “Arrayana” para este mismo periodo (11-12 años) con la misma metodología descrita anteriormente.

Tabla 17. Comparación de captura de CO₂ entre especies vegetales.

Planta	Edad	Días	Iteraciones	Ramas y Hojas	Captura de CO ₂ (gr)
Mandarina "Arrayana"	11 años	4.015	150	2,8545E+45	2,6678E-13
	12 años	4.380	163	2,3384E+49	2,1854E-09
	11-12 años	365	14	2,3381E+49	2,1852E-09
Palma de aceite	11-12 años	365	-	-	7,6923E+04

Nota: * Captura de CO₂ de la mandarina “Arrayana” –vs- la palma de aceite, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

En la Tabla 17 se puede resaltar que la captura de CO₂ hecha por las plantas en el periodo de 11 a 12 años de edad, varía notoriamente; el valor de captura de CO₂ de 7,6923E+04 gr de la palma de aceite (Aranda, y otros, 2018) es superior al de la mandarina “Arrayana”; esto se debe a que esta especie se caracteriza por su alto potencial de captura de CO₂ y alta productividad económica (Castilla, 2004); sin embargo, el cultivo de palma de aceite ocasiona cambios drásticos en los hábitats y conduce a cambios ambientales porque se modifica la estructura de la vegetación debido a las extensas áreas que se requieren para su cultivo, generando una pérdida de la biodiversidad, especialmente de aves nativas (Tamaris, López, & Rodríguez, 2017); lo cual no ocurre con los cultivos de mandarina “Arrayana”.

8.3.4. Actividad 4: Relación de la captura de CO₂, cantidad de ramas y hojas, iteraciones totales, crecimiento de altura total, concentración de nitratos, humedad y pH de las plantas.

Los resultados de las anteriores fases, se resumen en la Tabla 18.

Tabla 18. *Recopilación de las variables de la mandarina “Arrayana”.*

Bloque	Edad (meses)	N° Planta	Captura de CO ₂ acumulada	Iteraciones generadas	Iteraciones totales	Ramas y hojas acumuladas	Altura total	Tratamiento: Abono (gr)	Concentración de Nitratos	Humedad (%)	pH
A	15	1	1220,00	0	16	131071	76	0	7,5	20	6
		2	306,24	1	14	32767	91	45	-1,8	20	6
		3	4899,98	1	18	524287	86	35	2,9	10	6
		4	78399,80	7	22	8388607	79	40	2,5	10	6
		5	1224,99	1	16	131071	78	30	5,6	10	6
B	9	6	39199,90	9	21	4194303	80	45	7,1	10	6
		7	2449,98	5	17	262143	78	35	1,3	10	6
		8	78399,8	10	22	8388607	89	40	0,3	10	6
		9	38,27	0	11	4095	74	0	8,5	10	6
		10	156800	9	23	16777215	85	30	6,4	20	6
C	5	11	76,55	4	12	8191	65	35	2,9	20	6
		12	76,55	2	12	8191	65	45	41,8	30	6
		13	2,38	0	7	255	58	0	5,8	10	6
		14	9,56	2	9	1023	65	30	4,4	10	6
		15	9,56	0	9	1023	65	40	2,6	20	6

Nota: * Datos registrados de las variables por planta, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

Los datos registrados en la Tabla 18 fueron ingresados al software SPSS Statistics 25, excepto la variable pH debido a que su valor fue constante; para analizarlos estadísticamente a través de una matriz de correlación y un modelo de regresión lineal descritos a continuación:

Tabla 19. *Matriz de correlación entre las variables de las plantas.*

Correlaciones									
Variables de control			Captura de CO ₂	Iteraciones totales	Ramas y hojas acumuladas	Altura total	Tratamiento	Concentración de Nitratos	Humedad
Edad (meses)	Captura de CO ₂	Correlación	1,000	0,824	1,000	0,573	0,206	-0,100	-0,004
		Significación		0,000	0,000	0,032	0,480	0,733	0,990
	Iteraciones totales	Correlación	0,824	1,000	0,824	0,686	0,445	-0,024	-0,082
		Significación	0,000		0,000	0,007	0,111	0,936	0,781
	Ramas y hojas totales	Correlación	1,000	0,824	1,000	0,573	0,206	-0,100	-0,004
		Significación	0,000	0,000		0,032	0,480	0,733	0,990
	Altura total	Correlación	0,573	0,686	0,573	1,000	0,485	-0,218	-0,040
		Significación	0,032	0,007	0,032		0,079	0,453	0,893
	Tratamiento	Correlación	0,206	0,445	0,206	0,485	1,000	0,064	0,210
		Significación	0,480	0,111	0,480	0,079		0,827	0,471
	Concentración de Nitratos	Correlación	-0,100	-0,024	-0,100	-0,218	0,064	1,000	0,582
		Significación	0,733	0,936	0,733	0,453	0,827		0,029
	Humedad	Correlación	-0,004	-0,082	-0,004	-0,040	0,210	0,582	1,000
		Significación	0,990	0,781	0,990	0,893	0,471	0,029	

Nota: * Matriz de correlación elaborada en el software SPSS Statistics 25, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

En la Tabla 19 se observa la matriz de correlación entre las variables (captura de CO₂, ramas y hojas acumuladas, iteraciones totales, crecimiento de altura total, concentración de nitratos, humedad y pH) de las plantas, arrojada por el software tras ingresar la base de datos; esta permite categorizar el grado de correlación obtenido entre ellas. Se utilizaron los colores definidos en la Tabla 20 para categorizar el grado de correlación en la Tabla 19.

Tabla 20. Niveles de correlación.

Rango de correlación	Significado
$r = 1$	Correlación Perfecta
$0,8 < r < 1$	Correlación Muy Alta
$0,6 < r < 0,8$	Correlación Alta
$0,4 < r < 0,6$	Correlación Moderada
$0,2 < r < 0,4$	Correlación Baja
$0 < r < 0,2$	Correlación Muy Baja
$r = 0$	Correlación Nula

Nota: * Colores establecidos para los niveles de correlación, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020

De acuerdo a la clasificación por colores entre las variables en la Tabla 19; las correlaciones tenidas en cuenta para el modelo de regresión lineal fueron las clasificadas como baja, moderada y muy alta de la captura de CO₂ con respecto a las demás variables; teniendo en cuenta que esta será la variable dependiente en el modelo de regresión lineal. Por ejemplo, la correlación muy alta de 0,824 entre captura de CO₂ e iteraciones totales, significa que existe una correlación lineal entre estas variables; es decir, a medida que se posee una mayor cantidad de iteraciones, mayor será la captura de CO₂ por parte de la planta (González J. , 2009).

Las correlaciones bajas y perfectas de la captura de CO₂ con respecto a las demás variables no se tuvieron en cuenta debido a que, por un lado, la correlación baja no es significativa porque no existe una relación lineal entre ellas; sin embargo, podrían tener una relación no lineal; por otro lado, la correlación perfecta de valor 1 entre captura de CO₂ y ramas y hojas acumuladas no puede incluirse en el modelo debido a que la fuerza de la relación es lineal (Minitab, 2019); porque a partir de la cantidad de ramas y hojas acumuladas fue que se estimó la captura de CO₂.

De modo que las variables seleccionadas para incluir en el modelo de regresión lineal fueron: iteraciones totales, altura total (cm) y tratamiento.

Al ingresar las variables seleccionadas al software SPSS Statistics como variables independientes y la captura de CO₂ como la variable dependiente del modelo de regresión lineal, se obtuvieron la Tabla 21, Tabla 22 y Tabla 23.

La Tabla 21 representa la información básica del modelo, se destaca el valor de R cuadrado de 0,598; el cual indica que el modelo explica un 59,8% la captura de CO₂, en otras palabras, la captura de CO₂ se explica en un 59,8% por las variables iteraciones totales, altura total (cm) y tratamiento (González J. , 2009).

Tabla 21. *Resumen del modelo de regresión lineal.*

Resumen del modelo				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,773a	0,598	0,489	3,29E+04
a. Predictores: (Constante), Tratamiento, Altura total (cm), Iteraciones totales				

Nota: * Modelo de regresión lineal obtenido en el software SPSS Statistics 25, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

Posteriormente, el software arrojó una tabla ANOVA (Tabla 22) que permite determinar la validez del modelo completo.

Tabla 22. *Análisis de la varianza con un factor (ANOVA).*

ANOVA ^a						
Modelo	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.	
1	Regresión	1,77E+10	3	59,13E+08	5,457	,015b
	Residuo	1,19E+10	11	10,83E+08		
	Total	2,97E+10	14			
a. Variable dependiente: Captura de CO ₂ (gr)						
b. Predictores: (Constante), Tratamiento, Altura total (cm), Iteraciones totales						

Nota: * ANOVA obtenido en el software SPSS Statistics 25, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

Dado que el valor de Sig. debe ser menor a 0,05, el resultado de Sig. del presente estudio se encuentra por debajo, siendo 0,015, lo que permite demostrar que al menos una de las variables es estadísticamente distinta de cero; por tanto, se puede afirmar que el modelo es válido en su conjunto (González J. , 2009).

La Tabla 23 indica los coeficientes para cada una de las variables independientes incluidas en el modelo de regresión lineal.

Tabla 23. *Coeficientes del modelo de regresión lineal.*

Coeficientes ^a						
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error	Beta		
1	(Constante)	956,630	79267,781		0,012	0,991
	Iteraciones totales (X ₁)	8949,214	2783,500	1,017	3,215	0,008
	Altura total (cm) (X ₂)	-1418,526	1423,648	-0,310	-0,996	0,340
	Tratamiento (X ₃)	-204,438	581,437	-0,073	-0,352	0,732
a. Variable dependiente: Captura de CO ₂ (gr) (Y)						

Nota: * Coeficientes del modelo de regresión lineal obtenidos en el software SPSS Statistics 25, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2020.

De acuerdo a los coeficientes obtenidos, el modelo de regresión lineal se puede escribir de la siguiente manera: $Y = 956,630 + 8949,214X_1 - 1418,526X_2 - 204,438X_3 + \varepsilon$

Ecuación 8. *Modelo de regresión lineal para la captura de CO₂.*

Sin embargo, los valores de Sig. indican que las iteraciones totales (X₁) son estadísticamente distintos de cero (Sig.<0,05) con un valor de 0,008 lo que indica que es relevante para explicar la captura de CO₂ y puede permanecer en el modelo; a diferencia de las variables altura total (cm) (X₂) y tratamiento (X₃) con valores 0,340 y 0,732, respectivamente, que son superiores a 0,05 (Sig.>0,05) y no son considerados relevantes en el modelo (González J. , 2009).

De modo que, el modelo de regresión lineal es:

$$Y = 956,630 + 8949,214X_1 + \varepsilon$$

Ecuación 9. *Modelo de regresión lineal ajustado para la captura de CO₂.*

Donde, Y es la captura de CO₂, X₁ las iteraciones totales y ε el error aleatorio.

Conclusiones

El estudio de la captura de dióxido de carbono (CO₂) de la planta de mandarina “Arrayana” desde una perspectiva matemática y geométrica amplía el conocimiento de los servicios ecosistémicos brindados por los árboles; específicamente de su capacidad de actuar como sumidero de carbono y de ser un mecanismo de adaptación al calentamiento global, problemática de interés mundial ocasionada por el incremento de GEI en la atmósfera; entre ellos, el CO₂.

Para estimar la cantidad de dióxido de carbono capturado por parte de una planta de mandarina “Arrayana”; el trabajo de campo fue esencial debido a que permitió encontrar la relación existente entre cada proceso iterativo y el tiempo de repetición del patrón de crecimiento y de este modo, relacionar los L-sistemas (fractales) con el modelo de crecimiento exponencial.

La determinación de las variables (cantidad de segmentos en que se divide el tallo, razón en que se divide y dimensión fractal) del L-sistema (Tabla 7), a través de la observación detallada de una planta de mandarina “Arrayana” permitieron considerar esta especie como un objeto fractal para modelar su patrón de crecimiento siguiendo las instrucciones de Lindenmayer, obteniéndose $F = F + [F] - - [F]$.

El modelo matemático de crecimiento exponencial para calcular la biomasa aérea (ramas y hojas) de la planta de mandarina “Arrayana” en diferentes iteraciones, se aplicó a través de su solución general (

Ecuación 3), estableciendo las condiciones iniciales que permitieron despejar los valores de las constantes, dando como resultado la solución particular del modelo ($x(i) = e^{0,6931471806(i)}$) (Ecuación 5)), que permite reemplazar distintos valores de iteraciones y calcular su respectiva cantidad de ramas y hojas (Tabla 9).

A partir del diseño experimental del trabajo se pudo concluir que las plantas placebo (1, 9 y 13), cada una de bloques diferentes, no generaron iteraciones durante el estudio (Gráfica 6); mientras que las demás, independiente del tratamiento aplicado, manifestaron aumento en su cantidad de iteraciones. Es importante resaltar que el bloque B, correspondiente a las plantas 6-10 y de edad intermedia, fue el que evidenció mayor efecto de todos los tratamientos; ya que todas sus plantas tuvieron un aumento en sus iteraciones, superior al de las plantas de los bloques A y C. Sin embargo, los tratamientos 1 (Gráfica 7) y 4 (Gráfica 10), con menor y mayor cantidad de

abono, respectivamente, fueron los que mejores efectos generaron en el crecimiento de las iteraciones de las plantas del bloque B.

Los registros semanales de generación de iteraciones de las quince plantas sembradas (Tabla 10) permitieron determinar que una planta de mandarina “Arrayana” tarda en promedio 26,8 días en realizar una iteración. La planta 8 del bloque B, con un total de diez iteraciones generadas fue la que más iteraciones realizó durante las trece semanas de registro de datos (Gráfica 3); sin embargo, la planta 10 del bloque B con 23 iteraciones totales fue la que al finalizar el estudio tuvo mayor cantidad de iteraciones (Gráfica 2) y, por ende, mayor cantidad de ramas y hojas.

En cuanto a la altura de las plantas, la planta que más creció fue la N° 12, que aumentó su longitud en 20cm (Gráfica 12); sin embargo, esta no fue la que al final tuvo mayor altura; la planta 2 perteneciente al bloque A con 91 cm fue la más alta (Gráfica 11), lo cual era de esperarse debido a que el bloque A por ser el de plantas de mayor edad, al iniciar los registros presentaban mayor altura con respecto a los bloques B y C. Las plantas 12 y 2 se relacionan por el tratamiento aplicado (tratamiento 4) (Gráfica 10); lo que permite concluir que a pesar de que recibieron las mismas cantidades de triple 15, tienen tamaños distintos porque crecen a ritmos variados.

Las plantas representativas de crecimiento de iteraciones no son las mismas de crecimiento de longitud; por lo cual se infiere que el crecimiento de las iteraciones no está directamente relacionado con el aumento en la longitud de la planta.

Dentro de las quince plantas estudiadas, la planta 10 fue la que mayor cantidad de CO₂ capturó desde su germinación hasta la finalización de la toma de datos, con un valor de 156.800E-56gr; debido a que como se concluyó anteriormente, fue la planta que culminó con mayor cantidad de ramas y hojas.

La matriz de correlación (Tabla 19) de los datos registrados al final del estudio (Tabla 18), permitió concluir que las variables determinadas en la caracterización del suelo (pH, humedad y concentración de nitratos), no son significativas en la estimación de la captura de CO₂ porque presentaron una correlación muy baja con esta variable; por tal motivo se descartaron del modelo de regresión lineal. Las variables incluidas inicialmente en la regresión lineal fueron tratamiento, altura total e iteraciones totales, con correlaciones baja, moderada y muy alta, respectivamente, con la captura de CO₂ (Y); sin embargo, tras evaluar el valor de Sig. del modelo de regresión lineal obtenido en el software SPSS Statistics 25 (Tabla 23); solo la variable iteraciones (X_1) es

considerada relevante para el modelo, de modo que el modelo de regresión lineal ajustado es $Y = 956,630 + 8949,214X_1 + \varepsilon$ (Ecuación 9).

Recomendaciones

A pesar de que el interés principal de la presente investigación no es proporcionar información acerca de la captura de CO₂ de la mandarina “Arrayana” anual sino durante toda su vida, es decir, acumulada; la metodología empleada también puede ser utilizada para obtener los valores de captura de CO₂ de forma anual.

Se recomienda incluir en el estudio la determinación de otras variables que puedan influir significativamente en la estimación de la captura de CO₂ como pueden ser los frutos o las raíces de la planta, de tal forma que puedan ser incluidos en el modelo de regresión lineal y posiblemente mejorar su validez; adicional, un mayor tiempo de toma de datos favorecería la precisión de los mismos.

Dado que el modelo matemático utilizado para calcular el número de ramas y hojas de la planta de mandarina “Arrayana” está basado en un crecimiento exponencial y no se contempla el momento en el que el árbol deja de crecer y mantiene constante la cantidad de ramas y hojas; se recomienda complementarlo con otros modelos matemáticos que contemplen la capacidad de carga del árbol; por ejemplo, el modelo de crecimiento logístico.

La metodología empleada en esta investigación resulta innovadora porque no es una metodología destructiva, a diferencia de la mayoría de estudios que determinan la captura de CO₂ de las plantas; los resultados expuestos representan una fuente de información valiosa tanto para otras investigaciones como para las instituciones con intereses ambientales, sobre posibles escenarios de reducción del CO₂ atmosférico entre diferentes especies vegetales.

Referencias bibliográficas

- Abril, N., Bárcena, A., Fernández, E., Galván, A., Jorrín, J., Peinado, J., . . . Túnez, I. (2014). *Espectrofotometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas*. Obtenido de www.uco.es/dptos/bioquimica-biol-mol/pdfs/08_ESPECTROFOTOMETRIA.pdf
- Aguilar, P. (2003). *El efecto invernadero, el cambio climático, la crisis medioambiental y el futuro de la tierra*. Madrid: Real Academia Nacional de Medicina. Obtenido de <https://books.google.com.co/books?id=gIfC79hD7NoC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Almeida, M. (2016). *Validación de métodos analíticos para la determinación de nitratos, nitritos, ortofosfatos y nitrógeno amoniacal en aguas, en el laboratorio de SIAMA Ltda*. Obtenido de [Repository USTA: repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/9607/AlmeidaCujiaMarianMoreinys2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://Repository.USTA:repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/9607/AlmeidaCujiaMarianMoreinys2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Álvarez, A. (2005). *Fractales*. Obtenido de Matemáticas en la vida cotidiana: [www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_05_06/io2/public_html/images/curiosidades/Trabajo%20Fractales%20\(Amir%202006\).pdf](http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_05_06/io2/public_html/images/curiosidades/Trabajo%20Fractales%20(Amir%202006).pdf)
- Aranda, R., Ley, A., Arce, C., Pinto, R., Guevara, F., & Raj, D. (2018). Captura de carbono en la biomasa aérea de la palma de aceite en Chiapas, México. *Agron. Mesoam.*, 629-637. Obtenido de www.mag.go.cr/rev_meso/v29n03_629.pdf
- Avila, J. (2019). *Aplicaciones de las ecuaciones diferenciales en la ingeniería industrial*. Obtenido de <https://www.docsity.com/es/aplicaciones-de-ecuaciones-diferenciales-en-ingenieria-industrial/5029038/>
- Balta, R., Rodríguez, Á., Guerrero, R., Cachique, D., Alva, E., Arévalo, L., & Loli, O. (2015). Absorción y concentración de nitrógeno, fósforo y potasio en Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* L.) en suelos ácidos, San Martín, Perú. *Folia Amazónica*, 24, 123-130. Obtenido de www.iiap.org.pe/upload/publicacion/PUBL1446.pdf

- Banziger, M., Edmeades, G., & Bolaños, J. (1997). Relación entre el peso fresco y el peso seco del rastrojo de maíz en diferentes estados fenológicos del cultivo. *Agronomía Mesoamericana*, 20-25. Obtenido de <https://books.google.com.co/books?id=gIfC79hD7NoC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Barbazán, M. (1998). *Facultad de Agronomía, Universidad de la República*. Obtenido de Análisis de plantas y síntomas visuales de deficiencia de nutrientes: www.researchgate.net/profile/Monica_Barbazan/publication/267702791_AGRONOMIA_ANALISIS_DE_PLANTAS_Y_SINTOMAS_VISUALES_DE_DEFICIENCIA_DE_NUTRIENTES/links/56f123d608aea9fd53a881b5.pdf
- Bautista, D., Chavarro, C., Cáceres, J., & Buitrago, S. (2017). Efecto de la fertilización edáfica en el crecimiento y desarrollo de *Phaseolus vulgaris* cv. ICA Cerinza. *Revista Colombiana de ciencias hortícolas*, 11(1), 122-132. Obtenido de https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencias_horticolas/article/view/5496
- Bedoya González, W. E. (2016). Representación de fractales con L-sistemas. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional. Obtenido de funes.uniandes.edu.co/12009/1/Bedoya2016Representacion.pdf
- Benavides, H., & León Gloria. (2007). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Obtenido de www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf
- Benítez, S. (2011). *Tipos de investigación*. (U. M. Beltrán, Ed.) Obtenido de slideplayer.es/slide/4336794/
- Berríos, O., & Brinceño, M. Y. (2009). *Enfoques epistemológicos que orientan la investigación*. (U. d. Andes, Ed.) Obtenido de www.redalyc.org/pdf/4655/465545882009.pdf
- Borrero, J. (2012). *Biomasa aérea y contenido de carbono en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá*. (R. Javeriana, Ed.) Obtenido de repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8987/BorreroBenavidesJuanCamilo2012.pdf?sequence=1
- Caballero, M., Lozano, S., & Ortega, B. (10 de Octubre de 2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra.

- Revista Digital Universitaria*, 8(10). Obtenido de www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/oct_art78.pdf
- Camacho, C. (2010). *Universidad de Sevilla*. Obtenido de personal.us.es/vararey/adatos2/parcial.pdf
- Campos Muñoz, D. (26 de Agosto de 2011). *Introducción a los sistemas de Lindenmayer: fractales, autómatas celulares y aplicaciones*. (U. N. México, Ed.) Obtenido de delta.cs.cinvestav.mx/~mcintosh/cellularautomata/Summer_Research_files/Arti_Ver_Inv_2011_DCM.pdf
- Castilla, C. (2004). Potencial de captura de carbono por la palma de aceite en Colombia. *Palmas*, 25, 366-371. Obtenido de <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1101>
- Catalán, G. (2016). El pH del suelo en la agricultura. *Agropal*. Obtenido de www.agropal.com/es/el-ph-del-suelo/
- Córdoba, D., Vargas, J., López, J., & Muñoz, A. (2011). Crecimiento de la raíz en plantas jóvenes de *Pinus pinceana* Gordon en respuesta a la humedad del suelo. *Agrociencia*, 45(4), 14. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952011000400008
- De Petre, A., Karlin, U., Ali, S., & Reynero, N. (2016). *Proyectos de Investigación Aplicada a los Recursos Forestales Nativos*. Obtenido de infobosques.com/portal/wp-content/uploads/2016/02/Captura-de-carbono.pdf
- Di Benedetto, A., & Tognetti, J. (03 de Diciembre de 2016). Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA)*, 42(3), 26. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/864/86449712008.pdf>
- Díaz, L. (2011). *Psicología UNAM*. Obtenido de La Observación: www.psicologia.unam.mx/documentos/pdf/publicaciones/La_observacion_Lidia_Diaz_Sanjuan_Texto_Apoyo_Didactico_Metodo_Clinico_3_Sem.pdf
- Domínguez, A. (2016). *COLEF*. Obtenido de www.colef.mx/posgrado/wp-content/uploads/2016/12/TESIS-Dom%C3%ADnguez-Madrid-Ana-Yurendy.pdf
- Espada, J. L. (2013). (G. y. Gobierno de Aragón. Departamento de Agricultura, Ed.) Obtenido de bibliotecavirtual.aragon.es/bva/i18n/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=3707991

- Gallardo, Covelo, Morillas, & Delgado. (05 de 2009). Ciclos de nutrientes y procesos edáficos en los ecosistemas terrestres: especificidades del caso mediterráneo. *Ecosistemas*, 18(2). Obtenido de <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/60>
- Galván, L., & Reyes, R. (2009). Algunas herramientas para la prevención, control y mitigación de la contaminación ambiental. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 13(53). Obtenido de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212009000400003
- Garzón, J. (2017). *Evaluación de la aplicación de orina bovina sobre las emisiones de N₂O en suelos con pasturas productoras de inhibidores biológicos de la nitrificación en el Piedemonte Llanero*. Obtenido de bdigital.unal.edu.co/57862/1/Jaime%20Garzon%20Alfonso.%20Tesis%20Maestria.%2026-07-2017.pdf#page=55&zoom=100,132,101
- Gobernación del Meta. (1 de Abril de 2015). *Nuestro Departamento-Gobernación del Meta*. Obtenido de www.meta.gov.co/web/content/nuestro-departamento
- Gómez, K. (Octubre de 2013). *Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX)*. Obtenido de Evaluación del efecto de los fertilizantes químicos y orgánicos en el suelo, caso de estudio: Cultivo de Jitomate en invernadero tipo túnel: ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/49249/Octubre,%202013.pdf?sequence=1
- González, J. (2009). *Manual Básico SPSS*. Obtenido de Universidad de Talca: www.fibao.es/media/uploads/manual_basico_spss_universidad_de_talca.pdf
- González, J. (2014). *Efecto del uso y ocupación en las propiedades físicas y químicas en un suelo del piedemonte llanero*. Obtenido de bdigital.unal.edu.co/46801/1/51627124.2014.pdf
- González, L. R., & Tullo, C. (2019). Guía técnica cultivo de cítricos. San Lorenzo, Paraguay: Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción. Obtenido de https://www.jica.go.jp/paraguay/espanol/office/others/c8h0vm0000ad5gke-att/gt_03.pdf
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2005). *La captación y almacenamiento de dióxido de carbono*. Obtenido de archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_spm_ts_sp.pdf
- Halloy, S. (2008). Crecimiento exponencial y supervivencia del cardón (*Echinopsis atacamensis* subsp. pasacana) en su límite altitudinal. *Ecología en Bolivia*, 43(1), 6-15. Obtenido de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1605-25282008000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=en

- Ibáñez, A., Gisbert, B., & Moreno, H. (2012). *Oxisoles*. Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia: riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13598/Oxisol.pdf
- IDEAM. (29 de 06 de 2007). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Obtenido de Determinación de nitratos en aguas por espectrofotometría UV: www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Nitrato+en+agua+por+Espectrofotometr%C3%ADa+UV.pdf/ee058d7c-98fd-4d6c-924c-b4e5864c2d32
- IDEAM. (2010). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Obtenido de Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero: documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021658/2Comunicacion/IDEAMTOM_OIICap2.pdf
- IDEAM. (2015). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Obtenido de Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) Colombia: documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023421/cartilla_INGEI.pdf
- Kuehl, R. (2001). *Diseño de experimentos: Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación* (Segunda ed.). Thomson learning.
- Mactronica. (2019). *Medidor de pH y humedad del suelo*. Obtenido de www.mactronica.com.co/medidor-de-ph-humedad-del-suelo-524086067xJM
- Manzur, Y., & Alva, M. (2013). *Bonos de carbono: Una oportunidad de desarrollo para el Perú*. Obtenido de Pontificia Universidad Católica del Perú: tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/4662/MANZUR_YESSICA_ALVA_MARIA_BONOS_CARBONO.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Martel, C., & Cairampona, L. (2012). Cuantificación del carbono almacenado en formaciones vegetales amazónicas en CICRA, Madre de Dios (Perú). *Ecología aplicada*, 11(2). Obtenido de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726-22162012000200003&script=sci_arttext
- Mateus, D., & Pulido, X. (2010). Evaluación económica de la producción de cítricos cultivados en el Piedemonte del Departamento del Meta durante 12 años. *Orinoquía*, 14(1). Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/rori/v14n1/v14n1a03.pdf>
- Matus, P., & Lucero, R. (2002). Norma Primaria de calidad del aire. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, 18(2), 6. Obtenido de

- https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0717-73482002000200006&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- May, C., Pérez, A., Ruiz, E., Caamal, A., & García, A. (2011). Efecto de niveles de humedad en el crecimiento y potencial hídrico de *Capsicum chinense* Jacq. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14(3), 7. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000300032
- Minagricultura. (2018). *Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural*. Obtenido de Evaluaciones agropecuarias municipales (Cítricos): https://www.agronet.gov.co/Documents/8-C%C3%8DTRICOS_2017.pdf
- Minitab. (2019). *Soporte de Minitab 18*. Obtenido de support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/correlation/interpret-the-results/key-results/
- Mota, C., Alcaraz, C., Iglesias, M., Martínez, C., & Carvajal, M. (2011). *Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos*. (C.-C. S. Científicas, Ed.) Obtenido de LessCO₂: www.lessco2.es/pdfs/noticias/ponencia_cisc_espanol.pdf
- Muñoz, F. (2009). Importancia del agua en la nutrición de los cultivos. *Cenicaña*, 16-18. Obtenido de http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portaIIG/home_4/mod_virtuales/modulo2/5.pdf
- Navarrete, A., Vela, G., López, J., & Rodríguez, M. (2011). Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *ContactoS*, 80, 29-37. Obtenido de <http://www2.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n80ne/suelo.pdf>
- ONU. (2019). *Organización de las Naciones Unidas*. Obtenido de Cambio climático: www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html
- ONU. (2019). *Organización de las Naciones Unidas*. Obtenido de Objetivos de desarrollo sostenible: www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/
- Orduz, J. O. (2005). *Cultivo de cítricos*. Obtenido de repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/19139/44423_57532.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Orduz, J. O., Monroy, H. J., & Fisher, G. (2010). Comportamiento fenológico de la mandarina ‘Arrayana’ en el piedemonte del Meta, Colombia. *Agronomía Colombiana*, revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/17595/37345.
- Orduz, J., & Cagua, D. (2011). *Generalidades de los cítricos y recomendaciones agronómicas para su cultivo en Colombia*. Obtenido de <http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/561/1/CAPITULO%202.pdf>
- Orlandoni Merli, G. (1997). Modelos de crecimiento de poblaciones biológicas: un enfoque de dinámica de sistemas. Instituto de Estadística Aplicada y Computación, Universidad de Los Andes. Obtenido de www.researchgate.net/publication/242732763_MODELOS_DE_CRECIMIENTO_DE_POBLACIONES_BIOLOGICAS_UN_ENFOQUE_DE_DINAMICA_DE_SISTEMAS
- Páez, C. M. (2014). *Estimación de biomasa forestal y capacidad de captura de carbono de las especies forestales Weinmannia tomentosa y myrcianthes sp.* (U. N. (UNAD), Ed.) Obtenido de stadium.unad.edu.co/preview/UNAD.php?url=/bitstream/10596/8636/3/1049604432.pdf
- Paipa, N., & Triana, M. A. (2018). Estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea de un bosque húmedo tropical en Paimadó, Chocó. (I. USBMed, Ed.) 9, págs. 18-29. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/322965826_Estimacion_del_carbono_almacena do_en_la_biomasa_aerea_de_un_bosque_humedo_tropical_en_Paimado_Choco](https://www.researchgate.net/publication/322965826_Estimacion_del_carbono_almacena_do_en_la_biomasa_aerea_de_un_bosque_humedo_tropical_en_Paimado_Choco)
- Pardo, L., Reuben, G., Edwards, W., Rojas, A., & Laurance, W. (2017). Registros de puma (Puma concolor Linnaeus, 1771) en zona rural de San Carlos de Guaroa, Meta, Colombia. *Biodivers. Neotrop.*, 104-109. Obtenido de researchonline.jcu.edu.au/52978/1/Pardo%20et%20al_2017-registros%20de%20puma%20en%20San%20Carlos.pdf
- Pérez, M. (2014). *Características y clasificación de organismos autótrofos*. Obtenido de www.uaeh.edu.mx/docencia/P_Presentaciones/prepa3/Presentaciones_Enero_Junio_2014/Organismos%20autotrofos.pdf
- Querol, X. (2008). Calidad del aire, partículas en suspensión y metales. *Revista Española de Salud Pública*, 82(5). Obtenido de http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57272008000500001

- Quiceno, N., Tangarife, G., & Álvarez, R. (2016). Estimación del contenido de biomasa, fijación de carbono y servicios ambientales, en un área de bosque primario en el resguardo indígena Piapoco Chigüiro-Chátare de Barrancominas. *Luna azul issn(43)*. Obtenido de www.scielo.org.co/pdf/luaz/n43/n43a09.pdf
- Ramírez, D., & Cardozo, R. (2016). *Estimación de biomasa y carbono almacenado en fuste de árboles maduros del centro de formación de técnicos superiores forestales del alto Paraná*. Obtenido de Universidad Nacional del Este: ns2.une.edu.py:7004/repositorio/bitstream/handle/123456789/247/RAMIREZ_FIA_CA9.doc.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rivera, E., Sánchez, M., & Domínguez, H. (2018). pH como factor de crecimiento en plantas. *Revistas UTP*, 4(2), 5. Obtenido de <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/1829>
- Rodríguez, G., De Los Santos, H., González, V., Aldrete, A., Gómez, A., & Fierros, A. (2012). Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y bosques*, 18(1). Obtenido de www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712012000100003
- Rodríguez, N. (2013). *Guía para la cuantificación de la biomasa y el carbono forestal, generación de modelos y uso de herramientas para su estimación*. Obtenido de CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA - CAR: www.car.gov.co/uploads/files/5ade19e5bcb8e.pdf
- Rojas, J. (1995). *Estado del conocimiento sobre las particularidades del intercambio CO₂ entre el océano y la atmósfera*. Obtenido de documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021890/PARTICULARIDADESDELINTERCAMBIODEDIOXIDODECARBONOCO2ENTREELOCEANOYLAATMOSFERA.pdf
- Romero, M., Diego, F., & Álvarez, M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 12. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-30032006000200008
- Ruales, C. (2009). (U. d. Valle, Ed.) Obtenido de Gestión de los sistemas de información y telecomunicaciones: www.academia.edu/31685477/MODELACION_Y_SIMULACION_DE_SISTEMAS

- Rubiano, G. (2002). *Fractales para profanos*. Bogota, D.C , Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Ruiz, C., Rodríguez , G., Leyva, J., & Enríquez, J. (2014). *Metodologías para estimar biomasa y carbono en especies forestales de México*. Obtenido de www.ciidiroaxaca.ipn.mx/revista/sites/www.ciidiroaxaca.ipn.mx.revista/files/pdf/vol12num1/nyd_vol12_num1_2014_art3.pdf
- Salett, M., & Hein, N. (Diciembre de 1996). *Modelación matemática: Estrategia para enseñar y aprender matemáticas*. Obtenido de Revista de educación matemática: www.revista-educacion-matematica.org.mx/descargas/Vol11/1/10Salett.pdf
- Tamaris, D., López, H., & Rodríguez, N. (2017). Efecto de la estructura del cultivo de palma de aceite *Elaeis guineensis* (Arecaceae) sobre la diversidad de aves en un paisaje de la Orinoquía colombiana. *Biología tropical*, 65(4). Obtenido de https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442017000401569
- Valverde, T., Cano, Z., Meave, J., & Carabias, J. (2005). *Ecología y medio ambiente*. México: Pearson Educación.
- Vega, A. (2015). *El efecto del nitrógeno en las enfermedades de las plantas*. Obtenido de Facultad de agronomía e ingeniería forestal: agronomia.uc.cl/extension/133-el-efecto-del-nitrogeno-en-las-enfermedades-de-las-plantas/file
- Velasco, E., Romero, E., González, A., Moreno, F., & Pérez, R. (2012). *Funciones de biomasa y carbono aéreo aplicables a árboles de pinus pseudostrobus lindl. En México*. México. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/236123841_FUNCIONES_DE_BIOMASA_Y_CARBONO_AEREO_APLICABLES_A_ARBOLES_DE_PINUS_PSEUDOSTROBUS_LINDL_EN_MEXICO
- Veliz, Y., & León, R. (Junio de 2017). Modelo fractal para la representación morfológica de la planta *Capsicum annuum* L. en 3D. Modelo fractal para la representación morfológica de la planta *Capsicum annuum* L. en 3D. *Revista de Ciencias Agropecuarias*. Obtenido de scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542017000200009
- Villalba, L., Herrera, A., & Orduz, J. (2013). *Parámetros de calidad en la etapa de desarrollo y maduración en frutos de dos variedades y un cultivar de mandarina (Citrus reticulata Blanco)*. Obtenido de orinoquia.unillanos.edu.co/index.php/orinoquia/article/view/277/

World Meteorological Organization. (2017). *Greenhouse gas bulletin*. EE.UU: WMO. Obtenido de <https://public.wmo.int/en/resources/library/wmo-greenhouse-gas-bulletin>

Zill, D. (2009). *ECUACIONES DIFERENCIALES con aplicaciones de modelado* (Novena ed.). Cengage learning. Obtenido de cutbertblog.files.wordpress.com/2019/01/zill-d.g.-ecuaciones-diferenciales-con-aplicaciones-de-modelado-cengage-learning-2009.pdf






Apéndices






Apéndice A. Registros semanales de iteraciones y altura de las plantas, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.






Semana	Fecha	Bloque	A					B					C				
		Planta N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	27-08	Iteración	16	13	17	15	15	12	12	12	11	14	8	10	6	7	9
		Altura (cm)	74	80	84	67	70	70	67	73	69	71	48	45	53	47	53
1	03-09	Iteración	16	13	17	15	15	12	12	12	11	15	9	11	7	8	9
		Altura (cm)	74	82	84	67	70	70	68	73	69	71	48	45	53	47	53
2	10-09	Iteración	16	13	17	15	15	12	12	12	11	15	9	11	7	8	9
		Altura (cm)	74	82	84	68	72	71	68	73	69	72	48	45	54	48	53
3	17-09	Iteración	16	13	17	15	15	13	17	17	11	15	9	11	7	8	9
		Altura (cm)	75	83	86	68	73	72	68	74	69	76	58	50	55	50	54
4	24-09	Iteración	16	13	17	19	15	13	17	17	11	19	9	11	7	8	9
		Altura (cm)	75	83	86	68	73	72	70	75	69	78	59	55	57	52	54
5	01-10	Iteración	16	13	17	22	15	16	17	17	11	19	9	11	7	8	9
		Altura (cm)	75	83	86	70	74	72	70	77	70	78	61	55	57	54	55
6	08-10	Iteración	16	13	17	22	15	16	17	17	11	19	9	11	7	8	9
		Altura (cm)	75	83	86	74	74	75	70	81	70	80	61	55	57	54	55
7	15-10	Iteración	16	13	17	22	15	16	17	17	11	19	9	11	7	8	9
		Altura (cm)	75	83	86	74	74	75	70	81	70	80	61	55	57	54	55








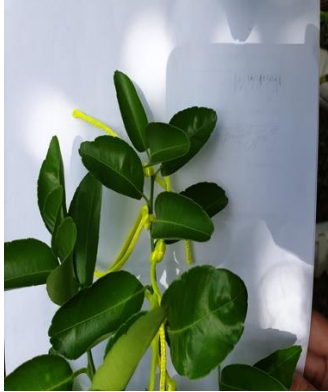


8	22-10	Iteración	16	14	18	22	16	17	17	22	11	23	9	12	7	9	9
		Altura (cm)	75	84	86	78	74	77	72	87	70	81	61	57	57	54	55
9	29-10	Iteración	16	14	18	22	16	17	17	22	11	23	9	12	7	9	9
		Altura (cm)	75	84	86	79	76	77	73	87	73	83	63	60	57	56	60
10	05-11	Iteración	16	14	18	22	16	17	17	22	11	23	12	12	7	9	9
		Altura (cm)	76	88	86	79	78	80	74	87	74	84	64	61	57	56	60
11	12-11	Iteración	16	14	18	22	16	21	17	22	11	23	12	12	7	9	9
		Altura (cm)	76	91	86	79	78	80	78	89	74	85	65	65	58	65	65
12	19-11	Iteración	16	14	18	22	16	21	17	22	11	23	12	12	7	9	9
		Altura (cm)	76	91	86	79	78	80	78	89	74	85	65	65	58	65	65
13	26-11	Iteración	16	14	18	22	16	21	17	22	11	23	12	12	7	9	9
		Altura (cm)	76	91	86	79	78	80	78	89	74	85	65	65	58	65	65











Apéndice B. Registros fotográficos semanales de las plantas, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.











Plantas Bloque A				
Fecha: 27 de agosto 2019				
Planta 1	Planta 2	Planta 3	Planta 4	Planta 5
				











Plantas Bloque B				
Fecha: 27 de agosto 2019				
Planta 6	Planta 7	Planta 8	Planta 9	Planta 10
				











Plantas Bloque C				
Fecha: 27 de agosto 2019				
Planta 11	Planta 12	Planta 13	Planta 14	Planta 15
 A photograph of a young mandarin tree (Planta 11) with a thin stem and several green leaves. The tree is planted in a mound of reddish-brown soil. A white label with the number '11' is placed at the base of the stem. The background is a plain, light-colored wall.	 A photograph of a young mandarin tree (Planta 12) with a thin stem and several green leaves. The tree is planted in a mound of reddish-brown soil. A white label with the number '12' is placed at the base of the stem. The background is a plain, light-colored wall.	 A photograph of a young mandarin tree (Planta 13) with a thin stem and several green leaves. The tree is planted in a mound of reddish-brown soil. A white label with the number '13' is placed at the base of the stem. The background is a plain, light-colored wall.	 A photograph of a young mandarin tree (Planta 14) with a thin stem and several green leaves. The tree is planted in a mound of reddish-brown soil. A white label with the number '14' is placed at the base of the stem. The background is a plain, light-colored wall.	 A photograph of a young mandarin tree (Planta 15) with a thin stem and several green leaves. The tree is planted in a mound of reddish-brown soil. A white label with the number '15' is placed at the base of the stem. The background is a plain, light-colored wall.











Plantas Bloque A				
Fecha: 3 de septiembre 2019				
Planta 1	Planta 2	Planta 3	Planta 4	Planta 5
				
				











Plantas Bloque B				
Fecha: 3 de septiembre 2019				
Planta 6	Planta 7	Planta 8	Planta 9	Planta 10
				
				











Plantas Bloque C				
Fecha: 3 de septiembre 2019				
Planta 11	Planta 12	Planta 13	Planta 14	Planta 15
				
				











Plantas Bloque A				
Fecha: 17 de septiembre 2019				
Planta 1	Planta 2	Planta 3	Planta 4	Planta 5
				
				











Plantas Bloque B				
Fecha: 17 de septiembre 2019				
Planta 6	Planta 7	Planta 8	Planta 9	Planta 10
				
				











Plantas Bloque C				
Fecha: 17 de septiembre 2019				
Planta 11	Planta 12	Planta 13	Planta 14	Planta 15
				
				











Plantas Bloque A				
Fecha: 24 de septiembre 2019				
Planta 1	Planta 2	Planta 3	Planta 4	Planta 5
				
				











Plantas Bloque B				
Fecha: 24 de septiembre 2019				
Planta 6	Planta 7	Planta 8	Planta 9	Planta 10
				
				











Plantas Bloque C				
Fecha: 24 de septiembre 2019				
Planta 11	Planta 12	Planta 13	Planta 14	Planta 15
				
				











Plantas Bloque A				
Fecha: 1 de octubre 2019				
Planta 1	Planta 2	Planta 3	Planta 4	Planta 5
				
				









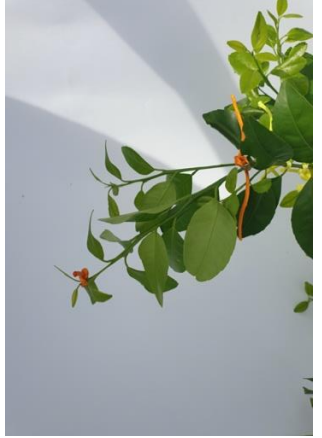

Plantas Bloque B				
Fecha: 1 de octubre 2019				
Planta 6	Planta 7	Planta 8	Planta 9	Planta 10
				
				









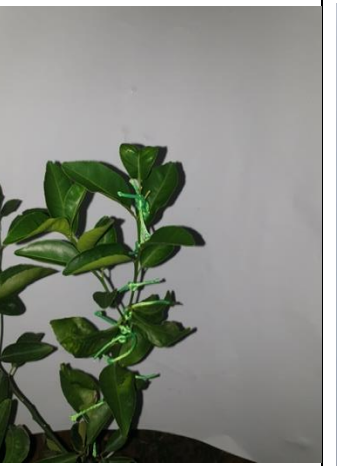

Plantas Bloque C				
Fecha: 1 de octubre 201				
Planta 11	Planta 12	Planta 13	Planta 14	Planta 15
				
				











Plantas Bloque A				
Fecha: 22 de octubre 2019				
Planta 1	Planta 2	Planta 3	Planta 4	Planta 5
				
				











Plantas Bloque B				
Fecha: 22 de octubre 2019				
Planta 6	Planta 7	Planta 8	Planta 9	Planta 10
				
				









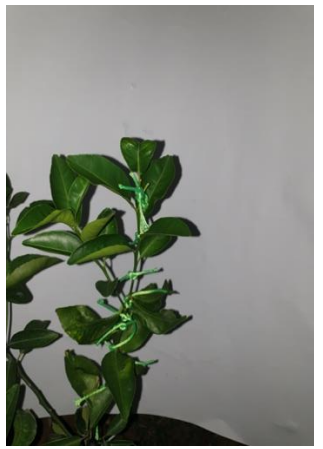

Plantas Bloque C				
Fecha: 22 de octubre 2019				
Planta 11	Planta 12	Planta 13	Planta 14	Planta 15
				
				











Plantas Bloque A				
Fecha: 5 de noviembre 2019				
Planta 1	Planta 2	Planta 3	Planta 4	Planta 5
				
				

Plantas Bloque B				
Fecha: 5 de noviembre 2019				
Planta 6	Planta 7	Planta 8	Planta 9	Planta 10
				
				

Plantas Bloque C				
Fecha: 5 de noviembre 2019				
Planta 11	Planta 12	Planta 13	Planta 14	Planta 15
				
				

Plantas Bloque A				
Fecha: 12 de noviembre 2019				
Planta 1	Planta 2	Planta 3	Planta 4	Planta 5
				
				

Plantas Bloque B				
Fecha: 12 de noviembre 2019				
Planta 6	Planta 7	Planta 8	Planta 9	Planta 10
				
				

Plantas Bloque C				
Fecha: 12 de noviembre 2019				
Planta 11	Planta 12	Planta 13	Planta 14	Planta 15
				
				


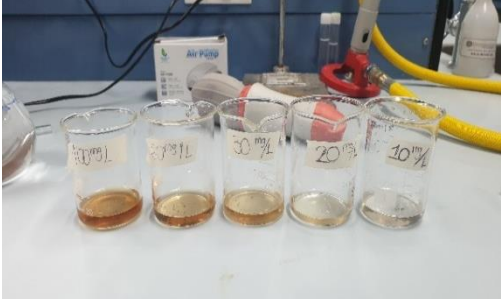



Apéndice C. *Evaluación inicial de la absorbancia a diferentes longitudes de onda para las soluciones patrón (Autores 2019).*

Longitud de onda (nm)	Concentraciones					Diferencias entre absorbancias				Sumatoria de las diferencias
	100ppm	60ppm	30ppm	20ppm	10ppm	(100-60) ppm	(60-30) ppm	(30-20) ppm	(20-10) ppm	
	Absorbancia									
300	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	0	0	0	0	0
305	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	0	0	0	0	0
310	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	0	0	0	0	0
315	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	0	0	0	0	0
320	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	0	0	0	0	0
325	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	0	0	0	0	0
330	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	0	0	0	0	0
335	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	0	0	0	0	0
340	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	0	0	0	0	0
345	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	0	0	0	0	0
350	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	0	0	0	0	0
355	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	0	0	0	0	0
360	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	0	0	0	0	0
365	3,5	3,5	3,5	3,283	3,443	0	0	0,217	-0,16	0
370	3,5	3,284	2,595	2,029	1,88	0,2160	0,689	0,566	0,149	1,6200
375	3,228	2,437	1,778	1,315	1,028	0,791	0,659	0,463	0,287	2,2000
380	3,139	2,088	1,43	1,006	0,669	1,0510	0,658	0,424	0,337	2,4700

385	3,056	1,906	1,265	0,866	0,518	1,1500	0,641	0,399	0,348	2,5380
390	2,892	1,784	1,164	0,79	0,449	1,108	0,62	0,374	0,341	2,4430
395	2,792	1,681	1,083	0,736	0,409	1,1110	0,598	0,347	0,327	2,3830
400	2,632	1,564	1,006	0,688	0,379	1,0680	0,558	0,318	0,309	2,2530
405	2,432	1,447	0,924	0,637	0,351	0,985	0,523	0,287	0,286	2,0810
410	2,232	1,321	0,839	0,584	0,324	0,9110	0,482	0,255	0,26	1,9080
415	2,016	1,196	0,756	0,533	0,296	0,8200	0,44	0,223	0,237	1,7200
420	1,812	1,073	0,674	0,482	0,269	0,739	0,399	0,192	0,213	1,5430
425	1,617	0,962	0,599	0,437	0,246	0,6550	0,363	0,162	0,191	1,3710
430	1,426	0,854	0,528	0,392	0,223	0,5720	0,326	0,136	0,169	1,2030
435	1,254	0,756	0,464	0,352	0,203	0,498	0,292	0,112	0,149	1,0510
440	1,101	0,669	0,406	0,315	0,184	0,4320	0,263	0,091	0,131	0,9170
445	0,966	0,593	0,354	0,284	0,167	0,3730	0,239	0,07	0,117	0,7990
450	0,853	0,529	0,312	0,258	0,154	0,324	0,217	0,054	0,104	0,6990
455	0,759	0,476	0,276	0,236	0,143	0,2830	0,2	0,04	0,093	0,6160
460	0,682	0,432	0,247	0,17	0,132	0,2500	0,185	0,077	0,038	0,5500
465	0,622	0,398	0,224	0,204	0,125	0,224	0,174	0,02	0,079	0,4970
470	0,573	0,37	0,205	0,191	0,119	0,2030	0,165	0,014	0,072	0,4540
475	0,535	0,349	0,191	0,182	0,114	0,1860	0,158	0,009	0,068	0,4210
480	0,505	0,332	0,179	0,174	0,109	0,173	0,153	0,005	0,065	0,3960
485	0,484	0,32	0,172	0,17	0,107	0,1640	0,148	0,002	0,063	0,3770
490	0,467	0,31	0,164	0,164	0,104	0,1570	0,146	0	0,06	0,3630

495	0,455	0,304	0,158	0,161	0,102	0,151	0,146	-0,003	0,059	0,3530
500	0,446	0,298	0,156	0,158	0,1	0,1480	0,142	-0,002	0,058	0,3460
505	0,439	0,294	0,153	0,156	0,099	0,1450	0,141	-0,003	0,057	0,3400
510	0,435	0,292	0,151	0,154	0,097	0,143	0,141	-0,003	0,057	0,3380
515	0,432	0,29	0,149	0,152	0,097	0,1420	0,141	-0,003	0,055	0,3350
520	0,43	0,289	0,148	0,151	0,096	0,1410	0,141	-0,003	0,055	0,3340
525	0,427	0,287	0,146	0,149	0,094	0,14	0,141	-0,003	0,055	0,3330
530	0,424	0,285	0,145	0,148	0,093	0,1390	0,14	-0,003	0,055	0,3310
535	0,42	0,283	0,144	0,146	0,093	0,1370	0,139	-0,002	0,053	0,3270
540	0,414	0,28	0,141	0,144	0,091	0,134	0,139	-0,003	0,053	0,3230
545	0,408	0,276	0,138	0,141	0,09	0,1320	0,138	-0,003	0,051	0,3180
550	0,4	0,272	0,135	0,138	0,089	0,1280	0,137	-0,003	0,049	0,3110
555	0,391	0,266	0,131	0,135	0,087	0,125	0,135	-0,004	0,048	0,3040
560	0,38	0,261	0,127	0,132	0,085	0,1190	0,134	-0,005	0,047	0,2950
565	0,37	0,254	0,123	0,129	0,084	0,1160	0,131	-0,006	0,045	0,2860
570	0,357	0,248	0,118	0,125	0,081	0,109	0,13	-0,007	0,044	0,2760
575	0,345	0,241	0,113	0,121	0,08	0,1040	0,128	-0,008	0,041	0,2650
580	0,331	0,233	0,108	0,117	0,078	0,0980	0,125	-0,009	0,039	0,2530
585	0,318	0,226	0,102	0,113	0,075	0,092	0,124	-0,011	0,038	0,2430
590	0,304	0,218	0,097	0,109	0,074	0,0860	0,121	-0,012	0,035	0,2300
595	0,29	0,21	0,091	0,105	0,071	0,0800	0,119	-0,014	0,034	0,2190
600	0,276	0,202	0,086	0,101	0,069	0,074	0,116	-0,015	0,032	0,2070

Apéndice D. Registros fotográficos del laboratorio de nitratos, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.

Fecha: 03 de Octubre de 2019	Aspecto: Curva de calibración para nitratos	
 <p>Figura 4. Diferentes concentraciones de nitrato de potasio (KNO₃), por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.</p>	 <p>Figura 5. Sachet de nitratos, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.</p>	 <p>Figura 6. Diferentes concentraciones de nitrato de potasio (KNO₃) con adición de sachet de nitratos, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.</p>
 <p>Figura 7. Celdas de cuarzo de espectrofotómetro, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.</p>	 <p>Figura 8. Solución de una concentración en la celda de cuarzo, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.</p>	 <p>Figura 9. Lectura en el espectrofotómetro, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.</p>

Fecha: 23 Octubre 2019

Aspecto: Determinación de nitratos



Figura 10. Muestras de suelo de los 15 puntos de siembra de las plantas después del proceso de secado, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.



Figura 11. Trituración y tamizaje de las muestras de suelo, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.



Figura 12. Mezcla de las muestras de suelo en 100 ml de agua destilada, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.



Figura 13. Soluciones de suelo (10ml) con adición de sachet de nitratos, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.

Apéndice E. *Valores de absorbancia y su promedio para cada muestra de suelo con su respectiva concentración de nitratos, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.*

Muestra	Absorbancia 1	Absorbancia 2	Absorbancia 3	Absorbancia 4	Absorbancia 5	Promedio de Absorbancias	Concentración de nitratos (ppm)
1	0,443	0,444	0,445	0,446	0,446	0,445	7,490
2	0,177	0,179	0,180	0,181	0,179	0,179	-1,784
3	0,290	0,319	0,323	0,320	0,321	0,315	2,944
4	0,294	0,303	0,304	0,304	0,303	0,302	2,490
5	0,364	0,395	0,399	0,402	0,398	0,392	5,632
6	0,422	0,436	0,436	0,437	0,438	0,434	7,106
7	0,265	0,266	0,268	0,269	0,270	0,268	1,303
8	0,237	0,240	0,241	0,240	0,241	0,240	0,332
9	0,475	0,467	0,474	0,473	0,475	0,473	8,468
10	0,414	0,415	0,413	0,414	0,410	0,413	6,387
11	0,308	0,312	0,316	0,315	0,313	0,313	2,881
12	1,417	1,425	1,425	1,436	1,436	1,428	41,814
13	0,401	0,394	0,396	0,397	0,397	0,397	5,821
14	0,351	0,353	0,359	0,358	0,358	0,356	4,382
15	0,301	0,302	0,305	0,305	0,307	0,304	2,574

Apéndice F. *Aplicación del modelo de crecimiento exponencial para el cálculo de la cantidad de ramas y hojas para distintas iteraciones y su acumulado, por María Gutiérrez. & María Gutiérrez, 2019.*

Iteración	Ramas y hojas por cada iteración	Acumulado de ramas y hojas	Iteración	Ramas y hojas por cada iteración	Acumulado de ramas y hojas	Iteración	Ramas y hojas por cada iteración	Acumulado de ramas y hojas
0	1	1	116	8,31E+34	1,66E+35	231	3,45E+69	6,90E+69
1	2	3	117	1,66E+35	3,32E+35	232	6,90E+69	1,38E+70
2	4	7	118	3,32E+35	6,65E+35	233	1,38E+70	2,76E+70
...				
12	4096	8191	128	3,40E+38	6,81E+38	243	1,41E+73	2,83E+73
13	8192	16383	129	6,81E+38	1,36E+39	244	2,83E+73	5,65E+73
14	16384	32767	130	1,36E+39	2,72E+39	245	5,65E+73	1,13E+74
...				
20	1,05E+06	2,10E+06	136	8,71E+40	1,74E+41	251	3,62E+75	7,24E+75
21	2,10E+06	4,19E+06	137	1,74E+41	3,48E+41	252	7,24E+75	1,45E+76
22	4,19E+06	8,39E+06	138	3,48E+41	6,97E+41	253	1,45E+76	2,89E+76
...				
41	2,20E+12	4,40E+12	157	1,83E+47	3,65E+47	272	7,59E+81	1,52E+82
42	4,40E+12	8,80E+12	158	3,65E+47	7,31E+47	273	1,52E+82	3,04E+82
43	8,80E+12	1,76E+13	159	7,31E+47	1,46E+48	274	3,04E+82	6,07E+82
...				

66	7,38E+19	1,48E+20	182	6,13E+54	1,23E+55	297	2,55E+89	5,09E+89
67	1,48E+20	2,95E+20	183	1,23E+55	2,45E+55	298	5,09E+89	1,02E+90
68	2,95E+20	5,90E+20	184	2,45E+55	4,90E+55	299	1,02E+90	2,04E+90
...				
75	3,78E+22	7,56E+22	190	1,57E+57	3,14E+57	306	1,30E+92	2,61E+92
76	7,56E+22	1,51E+23	191	3,14E+57	6,28E+57	307	2,61E+92	5,21E+92
77	1,51E+23	3,02E+23	192	6,28E+57	1,26E+58	308	5,21E+92	1,04E+93
...				
87	1,55E+26	3,09E+26	203	1,29E+61	2,57E+61	318	5,34E+95	1,07E+96
88	3,09E+26	6,19E+26	204	2,57E+61	5,14E+61	319	1,07E+96	2,14E+96
89	6,19E+26	1,24E+27	205	5,14E+61	1,03E+62	320	2,14E+96	4,27E+96
...				
101	2,54E+30	5,07E+30	217	2,11E+65	4,21E+65	332	8,75E+99	1,75E+100
102	5,07E+30	1,01E+31	218	4,21E+65	8,42E+65	333	1,75E+100	3,50E+100
103	1,01E+31	2,03E+31	219	8,42E+65	1,68E+66	334	3,50E+100	7,00E+100
...				
109	6,49E+32	1,30E+33	225	5,39E+67	1,08E+68	340	2,24E+102	4,48E+102
110	1,30E+33	2,60E+33	226	1,08E+68	2,16E+68	341	4,48E+102	8,96E+102
111	2,60E+33	5,19E+33	227	2,16E+68	4,31E+68	342	8,96E+102	1,79E+103
...				